

Poboljšanje kvalitete usluge primjenom višeodredišne topologije i višekanalne arhitekture u bežičnim senzorskim i akterskim mrežama

Horvat, Goran

Doctoral thesis / Disertacija

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:354817>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH
TEHNOLOGIJA OSIJEK

Goran Horvat

POBOLJŠANJE KVALITETE USLUGE PRIMJENOM
VIŠEODREDIŠNE TOPOLOGIJE I VIŠEKANALNE
ARHITEKTURE U BEŽIČNIM SENZORSKIM I AKTORSKIM
MREŽAMA

Doktorska disertacija

Osijek, 2017.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH
TEHNOLOGIJA OSIJEK

Goran Horvat

POBOLJŠANJE KVALITETE USLUGE PRIMJENOM
VIŠEODREDIŠNE TOPOLOGIJE I VIŠEKANALNE
ARHITEKTURE U BEŽIČNIM SENZORSKIM I AKTORSKIM
MREŽAMA

Doktorska disertacija

Osijek, 2017.

Doktorska disertacija izrađena je na Sveučilištu J. J. Strossmayera u Osijeku, Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Zavodu za komunikacije.

Mentor: prof. dr. sc. Drago Žagar, dipl. ing. el.

Doktorska disertacija ima: 177 stranica.

Doktorska disertacija br.: 61

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. dr. sc. Snježana Rimac-Drlje, redovita profesorica u trajnom zvanju, predsjednica, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek
2. dr. sc. Drago Žagar, redoviti profesor u trajnom zvanju, član/mentor, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek
3. dr. sc. Zdenko Kovačić, redoviti profesor, član, Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. dr. sc. Snježana Rimac-Drlje, redovita profesorica u trajnom zvanju, predsjednica, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek
2. dr. sc. Drago Žagar, redoviti profesor u trajnom zvanju, član/mentor, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek
3. dr. sc. Zdenko Kovačić, redoviti profesor, član, Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu
4. dr. sc. Krešimir Grgić, docent, član, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek
5. dr. sc. Davor Vinko, docent, član, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek

Datum obrane: 18. svibnja 2017. godine

Mojim roditeljima i obitelji

SADRŽAJ

1.	Uvod	1
2.	Bežične senzorske mreže (BSM)	5
2.1.	Karakteristike bežičnih senzorskih mreža	5
2.2.	Funkcionalnost čvorova i topologije BSM-a	9
2.3.	Primjene bežičnih senzorskih mreža	12
2.4.	Energetska učinkovitost i potrošnja energije u BSM	12
2.5.	Zaključak poglavlja	16
3.	Bežične senzorske i akterske mreže (BSAM)	17
3.1.	Problematika podrške kvaliteti usluge (QoS) u BSAM	20
3.2.	Pregled područja i otvorenih problema kvalitete usluge u BSAM	21
3.2.1.	Podsloj pristupa mediju - MAC	22
3.2.2.	Mrežni sloj - protokol usmjeravanja	25
3.2.3.	Hibridni protokoli - međuslojni pristup	27
3.3.	Primjene BSAM sa podrškom kvaliteti usluge	28
3.4.	Zaključak poglavlja	29
4.	Prijedlog hibridnog modela koordinacije u bežičnim senzorskim i akterskim mrežama	31
4.1.	Opis ispitnog okruženja	36
4.2.	Metrike QoS u BSAM i hibridnom modelu koordinacije	39
4.3.	Ispitivanje kvalitete usluge postojećih protokola	41
4.3.1.	IEEE 802.15.4 u načinu rada bez sinkronizacijskog impulsa	42
4.3.2.	IEEE 802.15.4 u načinu rada sa sinkronizacijskim impulsom	44
4.3.3.	Atmel LightWeight Mesh - LWM	46
4.3.4.	Usporedba postojećih protokola komunikacije	48
4.4.	Simulacija hibridnog modela koordinacije za odabrani LWM protokol	50
4.4.1.	Opis simulacijskog okruženja	51
4.4.2.	Analiza odstupanja rezultata simulacije od eksperimenta	55
4.4.3.	Prijedlog poboljšanja kvalitete usluge u BSAM primjenom višekanalne ar- hitekture i višeodredišne topologije	59
4.5.	Zaključak poglavlja	61

5.	Višekanalna arhitektura i višeodredišna topologija u BSAM	63
5.1.	Osnove primjene i prednosti višekanalne arhitekture mreže	63
5.2.	Problematika višekanalne arhitekture	63
5.3.	Višekanalni protokoli za BSM	65
5.3.1.	Statičko dodjeljivanje kanala	67
5.3.2.	Dinamičko dodjeljivanje kanala	68
5.3.3.	Polu-dinamičko dodjeljivanje kanala	69
5.4.	Višekanalni protokoli za BSAM	71
5.5.	Odabir višekanalne metode za primjenu u hibridnom modelu koordinacije	73
5.5.1.	CONTROL metoda	74
5.5.2.	ROD-SAN i ACS metoda	77
5.6.	Zaključak poglavlja	79
6.	Međuslojni algoritam i protokol komunikacije za poboljšanje kvalitete usluge u BSAM	81
6.1.	Prijedlog inicijalnog CLMC algoritma	82
6.2.	Vrednovanje predloženog CLMC algoritma metodom simulacije	87
6.3.	Prijedlog poboljšanja CLMC protokola prilagođenog za BSAM i hibridni model koordinacije: H-CLMC protokol	93
6.3.1.	Uvođenje vremenskog ograničenja promjene kanala i procjena vremena od- ziva (EWMA metoda)	95
6.3.2.	Proširenje klasifikatora statusa slojeva i procjena vjerojatnosti promjene ka- nala (EWMA metoda)	98
6.3.3.	Dohvaćanje CQPS podatka krajnjeg odredišta u mreži	99
6.3.4.	Unaprjeđenje algoritma procjene promjene kanala : H-CLMC algoritam . .	101
6.3.5.	Mrežni sloj i usmjeravanje u višekanalnoj arhitekturi	103
6.3.6.	Objedinjenje predložene metode u cjeloviti protokol komunikacije	105
6.4.	Vrednovanje predloženog protokola u mreži s jednim skokom	106
6.4.1.	Scenarij s 10 i 20 aktivnih čvorova u mreži	106
6.4.2.	Scenarij s 30 i 40 aktivnih čvorova u mreži	111
6.4.3.	Pregled ukupnog poboljšanja kvalitete usluge za sve scenarije	115
6.5.	Vrednovanje predloženog protokola u mrežama s više skokova	118
6.5.1.	Opis topologije i simulacijskog okruženja	118
6.5.2.	Scenarij s 50 aktivnih čvorova	120

6.5.3.	Scenarij sa 100 aktivnih čvorova	127
6.5.4.	Analiza utjecaja topologije mreže na performanse predloženog protokola . .	132
6.6.	Zaključak poglavlja	136
7.	Eksperimentalno vrednovanje predloženog protokola komunikacije	138
7.1.	Scenarij bez usmjeravanja, 10 do 40 aktivnih čvorova	139
7.2.	Scenarij s usmjeravanjem i 50 aktivnih čvorova u mreži	148
7.3.	Zaključak poglavlja	150
8.	Metoda procjena kvalitete usluge u velikim BSAM i hibridnom modelu koordinacije .	153
8.1.	Domet komunikacije i problem povezanosti velikih BSAM	154
8.1.1.	Problem povezanosti velikih BSAM	156
8.1.2.	Gustoća postavljanja čvorova u velikim BSAM	160
8.2.	Simulacijski okvir za velike BSAM	160
8.3.	Prijedlog metode procjene kvalitete usluge temeljene na CQPS pokazatelju i vje- rojatnosti uspješnog upita	162
8.4.	Zaključak poglavlja	171
9.	Zaključak	173
	Literatura	178
	Popis kratica	191
	Sažetak	194
	Abstract	195
	Životopis	196
	Prilog I	197

1. UVOD

Tehnološki napredak proteklog desetljeća rezultirao je pojavom novih tehnologija čije je postojanje izravno omogućeno minijaturizacijom komponenti i sklopova, povećanjem učinkovitosti te smanjenjem potrošnje energije sklopova. Učinkovitija bežična komunikacija stvorila je autonomni senzorski čvor malih dimenzija i male cijene. Iz spomenutoga proizašao je koncept Bežične Senzorske Mreže, BSM (engl. *Wireless Sensor Networks*, WSN) koji opisuje infrastrukturu sastavljenu od čvorova sa senzorskim, obradnim i komunikacijskim (primopredajnik) blokovima te napajanjem. Ovi čvorovi omogućuju nadziranje područja od interesa tj. promatranog područja [1, 2]. BSM postavljene su zbog izvršenja zadanog zadatka u dugom vremenskom periodu (od nekoliko mjeseci do nekoliko godina), stoga je glavni naglasak stavljen na očuvanje energije čvorova u BSM uz ispunjavanje postavljenih zahtjeva na mrežu [3, 4, 5].

Bežične senzorske mreže predstavljaju strukturu sažetu od velikog broja senzorskih čvorova raspoređenih u prostoru, sa zadaćom prikupljanja i odašiljanja podataka iz promatranog okoliša [2], [6]. Uz bežične senzorske čvorove koji prikupljaju podatke u mreži se nalazi i krajnje odredište (engl. *sink*), koordinator mreže ili *gateway*, čija je zadaća povezivanje BSM s krajnjim korisnikom. Razvojem mikroelektronike i ugradbenih računalnih sustava bežične senzorske mreže postaju sve naprednije, a njihovi senzorski čvorovi manji i učinkovitiji. Ukoliko se promatra arhitektura čvora, najvažniji dio predstavlja radijski primopredajnik zajedno s mikroprocesorom. Primopredajnik i mikroprocesor uspostavljaju dvostranu bežičnu komunikaciju sa ostalim čvorovima i neizostavne su komponente svakog čvora. Drugi neizostavni dio uključuje napajanje, čija je zadaća opskrba električnom energijom ostalih modula, a najčešće je u obliku baterijskog napajanja ili napajanja žetvom energije (engl. *Energy Harvesting*) [7, 8]. Naposljetku, osjetilne (senzorske) komponente osiguravaju digitalizaciju željenih veličina iz fizičkog svijeta u digitalno okruženje.

Drugo desetljeće istraživanja u području BSM-a predstavilo je veliki broj protokola, standarda i ostalih rješenja gdje BSM danas postaju komercijalno dostupna tehnologija s iznimno malo otvorenih problema područja. Iz osnovnih okvira BSM-a počinju se razvijati nove inačice mreže, gdje se pokazuju razni problemi područja koji i danas ostaju aktualni. Proliferacijom bežičnih senzorskih mreža u gotovo sve segmente društva dolazi do pojavljivanja potpuno novih domena primjene istih, što iziskuju razvoj sve učinkovitijih i prilagođenijih bežičnih senzorskih mreža. Isto tako, zbog činjenice da čvorovi postaju cjenovno sve pristupačniji, danas se pojavljuju mreže s velikim brojem čvorova koje moraju zadovoljiti razne primjene i aplikacije. Razvojem bežičnih tehnologija u

industriji, automatizaciji domova i drugih primjena dolazi do razvoja BSM-a u multifunkcionalne mreže, gdje se osim osjetila zahtijeva i djelovanje na promatrani okoliš. Ove vrste mreža nazivaju se bežične **Bežične Senzorske i Aktorske Mreže, BSAM** (engl. *Wireless Sensor and Actor Network*, WSAN) čija integracija s Internetom objekata (engl. *Internet of Things*, IoT) postaje neizostavna [9, 10].

Integracijom BSM-a i IoT-a te rastućim brojem čvorova u mreži pojavljuju se problemi komunikacije u mreži sa strane pouzdanosti komunikacije, kašnjenja, energetske učinkovitosti i ostalih aspekata koji su iznimno važni za ove vrste mreža [11]. Spomenuti problemi se mogu svrstati pod pojam problematike kvalitete usluge, QoS, (engl. *Quality of Service*) u novim klasama BSAM [12, 13, 14, 15]. Problem QoS u BSAM je problem koji se promatra sa različitih slojeva protokolnog stoga. Globalni konsensus jest da podsloj pristupa mediju (engl. *Medium Access Control*, MAC) i protokoli usmjeravanja podataka u mreži najviše utječu na kvalitetu usluge u bežičnoj senzorskoj i aktorskoj mreži [12, 13, 16]. Stoga, u cilju poboljšanja kvalitete usluge u mreži potrebno je unaprjeđenje postojećih protokola pristupa mediju i protokola usmjeravanja.

Uzimajući u obzir potrebe za novim primjenama BSAM-a i novim aplikacijama pokazuje se potreba za novim modelima komunikacije tj. koordinacije. Zbog činjenice da se u BSAM pojavljuju klasični modeli koordinacije koji predlažu ili potpuno centraliziranu ili potpuno distribuiranu arhitekturu, postavlja se pitanje kako se spomenute arhitekture mogu nositi s novim primjenama BSAM-a. Primjer primjene BSAM jest model komunikacije orijentiran na upit od strane čvora, gdje čvor u mreži šalje upit određenog sadržaja prema centru obrade izvan same BSAM. Zbog mogućih industrijskih primjena ovog modela jedan od zahtjeva koji se postavlja na mrežu je visoka pouzdanost i zalihost mreže, što nije moguće ostvariti koristeći postojeće modele koordinacije u BSAM. Sukladno tome, pokazuje se potreba za novim modelima koordinacije u BSAM koji omogućuje visoku pouzdanost i zalihost mreže, te toleranciju na kvarove, pri čemu dolazi do razvoja novog hibridnog modela koordinacije u BSAM.

Kako bi se ostvarilo poboljšanje kvalitete usluge u hibridnom modelu koordinacije pokazuje se potreba za novim komunikacijskim protokolom koji koristi odlike višekanalane arhitekture i višedredišne topologije u cilju poboljšanja performansi mreže. Kako bi protokol ostvario što veću učinkovitost, isti bi trebao biti osmišljen u međuslojnom pristupu tj. poprečnom dizajnu slojeva (engl. *cross-layered*) [17]. U tom postupku iznimno je bitna usporedba novog rješenja s postojećim rješenjima iz literature, sa strane prednosti i nedostataka istih. Isto tako, u spomenutoj usporedbi bitna je provedba eksperimentalnog vrednovanja u laboratorijskim uvjetima, uz vrednovanje me-

todom simulacije. Treba napomenuti kako je bitan aspekt vrednovanja same metode simulacije usporedba sa eksperimentom na predloženom ispitnom okruženju BSAM, čime je moguće smanjiti pogrešku eksperimenta i simulacije postupkom empirijskoga modeliranja mreže.

Naposljetku, postavlja se pitanje ponašanja predloženog protokola komunikacije u velikim mrežama koje imaju veliki broj čvorova i rasprostiru se na velikom promatranom području. Tu se postavlja pitanje procjene kvalitete usluge bez mogućnosti eksperimentalnog vrednovanja, zbog činjenice da se govori o nekoliko tisuća čvorova u mreži. Stoga, pokazuje se potreba za metodom procjene kvalitete usluge u velikim mrežama, na temelju poznatih rezultata mjerenja i simulacije u laboratorijskim uvjetima.

Zbog spomenutih vrućih tema i otvorenih problema područja, ova disertacija predlaže poboljšanje kvalitete usluge u bežičnim senzorskim i akterskim mrežama u novom hibridnom modelu koordinacije. Tijek istraživanja uključuje predstavljanje novog modela koordinacije u BSAM, identifikaciju problema predloženog modela koordinacije u BSAM te prijedlogom poboljšanja kvalitete usluge odabirom višekanalne arhitekture i višeodredišne topologije. Nadalje, u usporedbi s postojećim protokolima za višekanalnu arhitekturu disertacija predlaže novi komunikacijski protokol za poboljšanje kvalitete usluge, vrednovan kroz simulaciju i eksperiment. Naposljetku, u okviru ove disertacije predložena je metoda procjene kvalitete usluge u velikim BSAM i hibridnom modelu koordinacije.

Rad je strukturiran na sljedeći način: u drugom poglavlju prikazane su osnove bežičnih senzorskih mreža, stavljajući naglasak na njihove razlike prema klasičnim računalnim mrežama. Treće poglavlje prikazuje osnove bežičnih senzorskih i akterskih mreža (BSAM), njihove odlike i razlike u usporedbi s BSM te problematikom podrške kvaliteti usluge u istim. Nadalje, prikazan je pregled područja i otvorenih problema istraživanja te su istaknute primjene BSAM. Na temelju primjena BSAM definirani su problemi i nedostaci postojećih modela koordinacije u BSAM te je predstavljen okvir za predlaganje novog modela koordinacije.

U četvrtom poglavlju predložen je novi hibridni model koordinacije u bežičnim senzorskim i akterskim mrežama orijentiran na upit od strane čvorova u mreži. Za hibridni model koordinacije definirane su metrike kvalitete usluge te je provedeno eksperimentalno vrednovanje performansi postojećih standarda i protokola na hibridnom modelu koordinacije. Na temelju eksperimentalnog vrednovanja provedeno je empirijsko modeliranje parametara mreže te je predložen simulacijski model za odabrani protokol iz literature. Dobiveni simulacijski model uspoređen je s eksperimentom koristeći RMSE (engl. *Root Mean Square Error*) metriku. Na kraju ovog poglavlja

identificirani su problemi komunikacije te je predloženo poboljšanje kvalitete usluge primjenom višeodredišne topologije i višekanalne arhitekture.

U petom poglavlju prikazana su postojeća rješenja i metode odabira kanala u višekanalnoj arhitekturi i višeodredišnoj topologiji. Opisan je koncept višekanalne arhitekture, problematika višekanalne arhitekture te protokoli predstavnici BSM i BSAM područja. Na temelju postojećih rješenja odabrane su dvije metode koje pokazuju dobra svojstva primjene na BSAM i hibridni model koordinacije, te su identificirani problemi postojećih metoda.

Na temelju identificiranih problema, u šestom poglavlju, predložena je inicijalna metoda za poboljšanje postojećih rješenja te je napravljena usporedba i vrednovanje postojećih i nove metode. Uviđanjem nedostataka inicijalno predložene metode, predloženo je poboljšanje inicijalne metode u obliku nove metode i protokola komunikacije za poboljšanje kvalitete usluge u BSAM i hibridnom modelu koordinacije. Na predloženom protokolu izvršeno je vrednovanje metodom simulacije u scenarijima bez usmjeravanja i s usmjeravanjem, s različitim brojem čvorova u mreži (od 10 do 50). Sukladno vrednovanju, metodom simulacije provedeno je eksperimentalno vrednovanje predloženog protokola komunikacije u laboratorijskim uvjetima, što je opisano u sedmom poglavlju.

Naposljetku, u osmom poglavlju predložena je metoda procjene kvalitete usluge u velikim BSAM i predloženom hibridnom modelu koordinacije. Nakon definiranja otvorenih problema istraživanja u velikim BSAM predložen je simulacijski okvir te parametri simulacije na temelju srodne literature. Također, predložena je metoda procjene kvalitete usluge temeljena na empirijskom modelu kumulativnog broja upita u cijeloj mreži u jedinici vremena i vjerojatnosti uspješnog upita. Predložen je model za različite brojeve krajnjih odredišta u mreži te su opisane prednosti i nedostaci predložene metode.

Predloženim tijekom istraživanja ova disertacija sadrži četiri izvorna znanstvena doprinosa, i to:

1. Hibridni model koordinacije u bežičnim senzorskim i aktorskim mrežama za primjenu u stvarno-vremenskim komunikacijskim sustavima.
2. Međuslojni algoritam i protokol komunikacije za poboljšanje kvalitete usluge primjenom višeodredišne topologije i višekanalne arhitekture mreže.
3. Eksperimentalno vrednovanje predloženog protokola komunikacije.
4. Metoda procjene kvalitete usluge u velikim bežičnim senzorskim i aktorskim mrežama postupkom skaliranja uz primjenu hibridnog modela koordinacije.

2. BEŽIČNE SENZORSKE MREŽE (BSM)

Razvojem mikro-elektronike i ugradbenih računalnih sustava malih dimenzija (tzv. mikroupravljača, engl. *microcontroller*) u proteklom desetljeću tehnološki je postalo moguće dizajnirati sustav sastavljen od osjetila (senzora), obradbenih komponenti i radio-frekvencijskog modula izričito malih dimenzija, male potrošnje energije te ekonomski prihvatljive cijene. Ovaj sustav u širem istraživačkom krugu postaje poznat kao bežični senzorski čvor (BSČ). Odlike BSČ uključuju mogućnost masovne proizvodnje te postavljanja na poprilično velike razmjere promatranog okoliša. Razvojem senzorskog čvora rodila se ideja međusobnog povezivanja istih s ciljem razmjene informacija, proširenjem dometa komunikacije te uspostavljanjem zalihosti samog mjerenja. Povezivanje čvorova u bežičnu mrežu rezultiralo je stvaranjem koncepta bežične senzorske mreže (BSM) [1].

Bežične senzorske mreže, prema ideji, ne sadrže nikakvu infrastrukturu već se sastoje od velikog broja bežičnih senzorskih čvorova koji međusobno čine bežičnu mrežu. BSM predstavlja značajno poboljšanje u odnosu na klasične pristupe postavljanja senzora (osjetila) koji najčešće zahtijevaju žičnu vezu do svakog senzora, pri čemu se podatci obrađuju agregirano na centralnoj lokaciji. Zbog povećanja broja senzora potrebnih za dohvaćanje pouzdane informacije iz okoliša, koncept klasičnih žičnih senzorskih mreža se polako napušta te se prelazi na bežične inačice senzorskih sustava. Kako se BSM najčešće sastoje od velikog broja čvorova koji su gusto raspoređeni u promatranom okolišu, komunikacija između izvora i odredišta (engl. *end-to-end*) odvija se kroz više skokova (engl. *Multihop communication*), budući da se na taj način obično troši manje energije nego kod izravne komunikacije (engl. *single hop communication*). S druge strane, koristeći komunikaciju s više skokova unosi se dodatno kašnjenje u komunikaciju što je potrebno odvagnuti u ovisnosti o samoj primjeni [3, 4, 5].

2.1. Karakteristike bežičnih senzorskih mreža

Kod bežičnih senzorskih mreža veliki problem predstavlja ograničenost resursa oko čega je potrebno izgraditi funkcionalnu i učinkovitu bežičnu mrežu. Glavne razlike bežične senzorske mreže u usporedbi s klasičnim računalnim mrežama mogu se prikazati kroz [15, 18]:

- *Ograničenost resursa:* Veliki problem u BSM jest ograničenost resursa bežičnih čvorova kao što su energija za napajanje, količina obrade informacija, ograničeni radijski domet, veličina memorije i sl. Primaran naglasak kod BSM-a je stavljen na energetske učinkovitost

čvorova (smanjenje potrošnje energije) te povećanje autonomije mreže. Također, veliko komunikacijsko ograničenje BSM-a jest mala vrijednost kapaciteta komunikacijskog kanala. Kao rezultat ovih ograničenja svaki mehanizam koji se implementira u BSM mora imati naglasak na jednostavnosti.

- *Neujednačen i mješovit promet:* U većini slučajeva promet teče od velikog broja krajnjih čvorova do najčešće jednog odredišnog čvora, krajnjeg odredišta u mreži (engl. *sink node*), što predstavlja neujednačenost potrošnje energije u blizini krajnjeg odredišta u mreži.
- *Zalihost podataka:* BSM su karakteristične po velikoj zalihosti podataka, zbog činjenice da nekoliko čvorova promatra događaj te prosljeđuje iste ili vrlo slične informacije o događaju prema odredišnom čvoru u mreži. Ovo uzrokuje povećani broj podatkovnih tokova što se može spriječiti sakupljanjem podataka (engl. *data aggregation*).
- *Dinamičnost mreže:* U mobilnim mrežama dinamičnost proizlazi iz same mobilnosti čvorova, dok se u stacionarnim mrežama dinamičnosti može očitovati kao promjena mreže nastala uslijed kvara pojedinog čvora, radio frekvencijskih smetnji na pojedinom putu u mreži ili ispadanjem pojedinih čvorova iz mreže zbog zagušenja [19].
- *Heterogenost mreže:* Iako se većina postojećih mreža zasniva na homogenoj konfiguraciji, uvođenje različitih tipova senzorskih čvorova može doprinijeti heterogenosti mreže [20].
- *Balansiranje potrošnje energije:* Kako bi se postigao što duži životni vijek mreže potrebno je balansirati potrošnju energije između čvorova, kako se ne bi dogodilo da ključni usmjerivački čvorovi ostanu bez energije i samim time onesposobe dio mreže ili cijelu mrežu [21, 22, 23].
- *Skalabilnost:* Bežična senzorska mreža mora se moći prilagoditi skaliranju po veličini, tako da se povećanjem broja senzorskih čvorova u mreži performanse mreže ne degradiraju [18, 24].
- *Nekoliko odredišta podatkovnih tokova:* Moguće je postojanje više odredišta podatkovnih tokova u mreži, gdje svako odredište postavlja specifične zahtjeve na mrežu (npr. jedno odredište može potraživati podatke visoke klase važnosti dok drugo odredište može potraživati podatke manje važnosti).

Ove karakteristike bežičnih senzorskih mreža pokazuju kako se klasični postupci iz računalnih mreža ne mogu jednostavno primijeniti na razini bežične senzorske mreže. Jedan od zahtjeva koji se pojavljuju u klasičnim računalnim mrežama je potraživanje kvalitete usluge, QoS, (engl. *Quality of Service*) za specifične aplikacije. Kako bi se detaljnije objasnila potreba za QoS u BSM u ovom

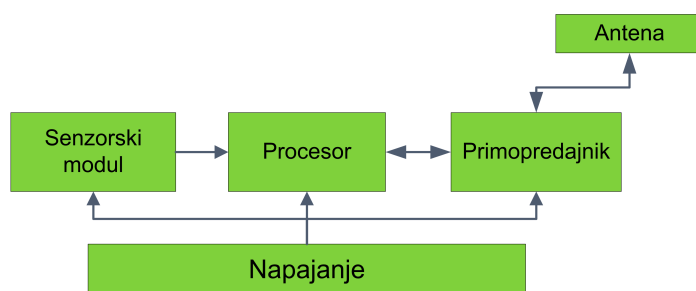
poglavlju dan je pregled primjena bežičnih senzorskih mreža s naglaskom na aplikacije koje mogu potraživati određenu razinu kvalitete usluge.

Ove aplikacije često zahtijevaju parametre kao što su malo kašnjenje i kolebanje kašnjenja, veliku brzinu prijenosa podatka te malu učestalost pogreške, što ne odgovara konceptu BSM-a. Zbog spomenutih zahtjeva na BSM pojavljuju se nove vrste bežičnih senzorskih mreža kao što su bežične multimedijske senzorske mreže (engl. *Wireless Multimedia Sensor Networks*, WMSN) [25, 26], bežične senzorske i aktorske mreže, BSAM, (engl. *Wireless Sensor and Actuator Networks*, WSAN)[27] i druge podvrste sa specifičnim zahtjevima na mrežu. Ukoliko se spomenuti zahtjevi obuhvate u jedan koncept dolazi se do koncepta bežične senzorske mreže s mogućnošću podrške kvaliteti usluge (QoS) za specifične aplikacije [13].

Kako je bežična senzorska mreža sastavljena od čvorova, iznimno je bitno opisati arhitekturu bežičnog senzorskog čvora (BSČ). Bežični senzorski čvor sastoji se od osjetilnih (mjernih), obradbenih, komunikacijskih blokova i dodatnih blokova. Općenito se može prikazati pomoću četiri osnovne komponente (slika 2.1):

1. Senzorski modul;
2. Procesor;
3. Primopredajnik i antena;
4. Napajanje.

Senzorski modul sadrži osjetilne članove (senzore) različitih vrsta čija je zadaća pretvaranje informacija iz stvarnog svijeta u digitalni oblik. Procesor je najčešće utjelovljen kao mikroupravljač koji upravlja ostalim modulima unutar čvora. Njegova je zadaća obrada podataka i implementacija protokolnog stoga za komunikaciju s ostalim čvorovima. Primopredajnik uspostavlja dvostranu bežičnu komunikaciju s ostalim čvorovima dok je zadaća napajanja opskrba električnom energijom ostalih modula, a najčešće je u obliku baterijskog napajanja ili napajanja žetvom energije [7, 8].

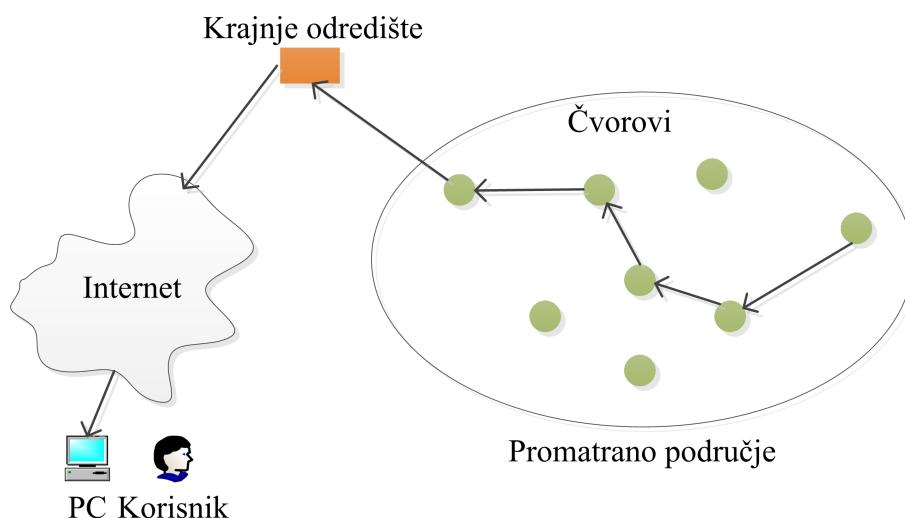


Slika 2.1. Arhitektura bežičnog senzorskog čvora

Kada se govori o podjeli bežičnih senzorskih mreža sa strane postavljanja senzorskih čvorova, općenito postoje dvije vrste bežičnih senzorskih mreža [28]:

- *Strukturirane mreže* - postavljanje čvorova je prethodno definirano prema predloženom obrascu,
- *Nestrukturirane mreže* - sadrže veliki broj čvorova najčešće rasprostranjenih na *ad-hoc* način ili na prethodno definirani nasumični način postavljanja [22].

Iako su strukturirane mreže bolje organizirane s aspekta učinkovitog pokrivanja promatranog područja, uspostavljanje strukturirane mreže nije uvijek moguće ostvariti (npr. postavljanje BSM za taktičke potrebe u vojne svrhe). Zbog ove činjenice, istraživanje u ovoj disertaciji je usmjereno na nestrukturirane bežične senzorske mreže koje su oblikovane nasumičnim postavljanjem čvorova.



Slika 2.2. Arhitektura bežične senzorske mreže

Zbog činjenice da BSM ima zadaću prijenosa podataka od mjesta događaja do odredišta podataka u mreži, u bežičnoj senzorskoj mreži uvijek postoji najčešće jedno krajnje odredište (engl. *sink node*) prema kojemu su svi podatkovni tokovi usmjereni. Taj čvor se još naziva i krajnji čvor, mrežni koordinator, bazna stanica ili *gateway* uređaj, koji je najčešće povezan s odredištem informacija (slika 2.2)[29]. Stoga, u bežičnoj senzorskoj mreži postoje četiri modela prijenosa podataka, koji ovise o specifičnoj aplikaciji, i to [12, 15, 30]:

- *Prijenos potaknut događajem* (engl. *event-driven*) - Ovaj model opisuje zahtjev za prijenosom podataka kada se dogodi očekivani događaj u promatranom području, od područja gdje se dogodio događaj (koje obuhvaća nekoliko čvorova) do krajnjeg odredišta u mreži. Prijenos podataka se potiče događajem, stoga ovaj model predstavlja asinkronu komunikaciju.
- *Prijenos potaknut upitom* (engl. *query-driven*) - Karakteristike ovog modela su dohvaćanje

željenih podataka senzorskih čvorova od strane krajnjeg odredišta u mreži (engl. *gateway*, *sink*). Kako krajnje odredište šalje upite senzorskim čvorovima za željene podatke, ovaj model predstavlja sinkronu komunikaciju.

- *Kontinuirani prijenos podataka* (engl. *continuous*) - Predstavlja model slanja podataka gdje senzorski čvorovi kontinuirano šalju podatke odredišnom čvoru definiranim intenzitetom. Ovaj model je primjenjiv za prijenos podataka kao što su stvarno vremenski podatci iz klasa video i audio strujanja te kritičnih podataka koji se moraju poslati u zadanom vremenu.
- *Hibridni modeli*: Omogućuju suživot prethodno opisanih modela prijenosa podataka, što predstavlja nužan pristup prijenosu podataka za specifične aplikacije kao što su stvarno vremenska komunikacija ili zahtjev za video ili audio strujanjem pri prijenosu multimedije. Isto tako, stvaranje hibridnog modela je nužan uvjet za stvaranje bežične multimedijske senzorske mreže [16, 31].

Nastavno na hibridni model pojavljuje se potreba za još jednim specifičnim modelom komunikacije u BSM koji je orijentiran prema BSAM. Ovaj komunikacijski model obuhvaća model prijenosa potaknutim upitom od strane senzorskog čvora, gdje BSČ šalje upit izvan BSM i očekuje odgovor na svoj upit (detaljnije opisano u poglavlju 4).

2.2. Funkcionalnost čvorova i topologije BSM-a

Kao što je opisano u prethodnom poglavlju, BSM se sastoji od velikog broja BSČ koji tvore bežičnu mrežu te je osmišljena za određenu primjenu. Ovisno o primjeni, BSM mogu tvoriti različite topologije mreže. Topologija mreže opisuje veze između čvorova i način komunikacije te samu funkcionalnost svakog čvora. U BSM možemo definirati tri vrste i funkcionalnosti čvorova:

- **Koordinatorski čvor/Krajnje odredište** (engl. *Coordinator*, *Network sink*) ima zadaću uspostavljanja i koordiniranja cijele mreže (npr. *ZigBee* standard) i predstavlja krajnje odredište podataka u mreži. Nadalje, on je najčešće poveznica, tj. *gateway* uređaj između BSM i ostalih mreža (LAN, WiFi i sl.) gdje je cilj povezivanje BSM-a s Internetom objekata, IoT i Internet mrežom općenito. Iako se u pravilu naziva koordinator mreže, u nekim standardima i primjenama moguće je imati više koordinatora u mreži, gdje u tom slučaju oni samo fiktivno preuzimaju funkciju koordiniranja mreže te se mreža sama prilagođava novonastalim uvjetima. Ovaj pristup predstavlja napredak u pogledu klasičnih pristupa te se mreža razvija iz centraliziranog okruženja u distribuirano okruženje.
- **Usmjerivački čvor** (engl. *Router*) ima zadaću usmjeravanja podataka u BSM. Ovisno o

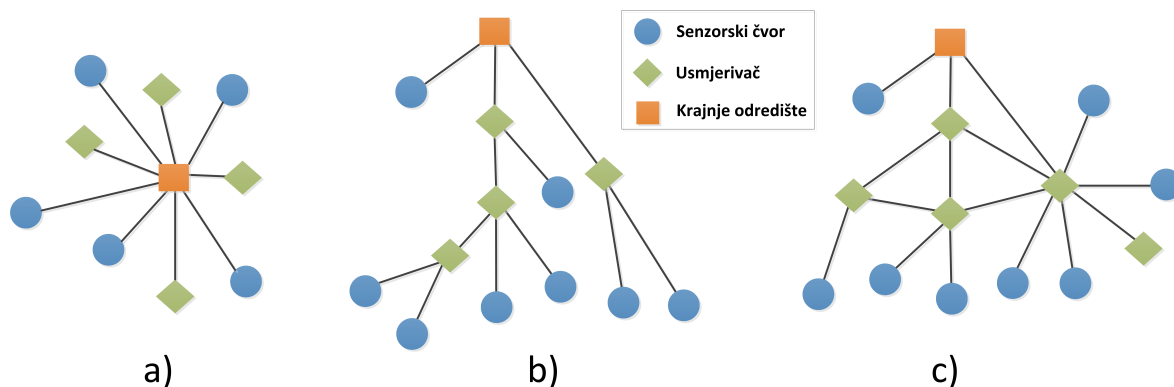
broju usmjerivača, njihovoj poziciji naspram čvorova i njihovoj međusobnoj poziciji mogu se razlikovati različite topologije mreže. U pravilu, usmjerivač je FFD (engl. *Fully Functional Device*) tj. napajan je iz elektroenergetske mreže, zbog velike potrošnje energije. Zadaća usmjerivačkih čvorova je na što učinkovitiji način proslijediti dobivenu informaciju prema svom odredištu u mreži. U tom postupku usmjerivački čvorovi koriste se postupkom usmjeravanja u mreži predloženim u okviru protokola usmjeravanja. Razvojem BSM usmjerivački čvorovi postaju koordinatori grozdova (engl. *clusters*), zbog činjenice da najčešće koordiniraju manji broj čvorova okupljenih u jednostavnu zvjezdastu topologiju oko usmjerivača. U toj ulozi njihova funkcionalnost može biti i dinamička, izmjenjujući se od krajnjeg čvora do usmjerivača i natrag.

- **Krajnji (senzorski) čvor** (engl. *Leaf node, Sensor node*) predstavlja najbitniji dio mreže zbog činjenice da je glavna funkcionalnost krajnjeg čvora funkcija osjeta (senzorska funkcija). Krajnji čvor ima zadatak detektirati događaj (ili veličinu) iz promatranog senzorskog polja, obraditi isti (unutar svojih mogućnosti) te proslijediti sadržaj detektiranog događaja krajnjem odredištu u mreži. U tom postupku krajnji čvor koristi senzore (osjetila) za dohvaćanje stanja okoliša te radio-prijemnik za proslijeđivanje istih prema usmjerivačkim čvorovima. Isto tako, budući da su krajnji čvorovi često napajani baterijski (ili iz izvora žetve energije) njihova energetska učinkovitost je često stavljena u prvi plan. Kako bi se smanjila količina potrošene energije krajnji čvorovi su često neaktivni te se nalaze u načinu rada koji se naziva "spavanje" (engl. *sleep*) i klasificiraju se kao RFD (engl. *Reduced Functionality Device*). Čvorovi koji spavaju troše iznimno malo energije te se bude samo na detektirani događaj (ili periodički) te u aktivnom stanju šalju potrebne informacije dalje u mrežu.

Iz opisanih osnovnih funkcionalnosti čvorova u BSM mogu se definirati tri osnovne topologije bežičnih senzorskih mreža. Spomenute topologije prikazane su na slici 2.3 i uključuju osnovne topologije zvijezde, stabla i mješovitu topologiju [28].

Topologija zvijezde (slika 2.3a) predstavlja osnovnu topologiju u BSM na temelju čega su građene sve ostale topologije. Ona opisuje klasičnu $1 : N$ konfiguraciju gdje N čvorova pristupa krajnjem odredištu u mreži. U ovoj konfiguraciji usmjerivački čvorovi imaju jednaku funkcionalnost kao i krajnji čvorovi i ne koriste se za usmjeravanje podataka. Proučavanje ove osnovne topologije od iznimne je važnosti jer se dobiveni modeli ove konfiguracije mogu primijeniti za sve ostale topologije.

Sljedeća topologija je topologija stabla (slika 2.3b). Ona predstavlja nadogradnju na osnovnu



Slika 2.3. Najčešće topologije korištene u BSM; a) topologija zvijezde, b) topologija stabla, c) mješovita (engl. *mesh*) topologija

topologiju zvijezde gdje se funkcionalnost mreže proširuje koristeći usmjerivačke čvorove (zeleno označeni na slici). U ovoj osnovnoj topologiji stabla mreža se grana od krajnjeg odredišta prema krajnjim čvorovima (listovima). Svaki usmjerivač posjeduje informaciju koji čvor mu je podređen a koji čvor mu je nadređen. Ovaj tip topologije moguć je samo u statičnim mrežama i mrežama čiji čvorovi imaju vrlo visoku raspoloživost, zbog činjenice da u slučaju otkazivanja jednog usmjerivačkog čvora sve veze prema ostalim krajnjim čvorovima su odsječene. S druge strane, zbog jednostavnosti topologije usmjeravanje podataka u mreži je iznimno jednostavno.

Naposljetku, posljednja topologija kombinira prethodne dvije topologije te se dolazi do mješovite topologije (engl. *mesh*), (slika 2.3c). Glavna odlika ove topologije jest njezina tolerancija na kvarove u mreži, gdje je ispadom jednog usmjerivačkog čvora moguće ostvariti drugi put kroz mrežu sve do odredišta. Ova topologija predstavlja topologiju koja najviše odgovara realnim mrežama, no zbog raznih puteva (trasa, ruta) kojima se podatci šalju u mreži potreban je učinkovit protokol usmjeravanja.

Navedeni problem usmjeravanja postaje izričito izražen u velikim mrežama koje sadrže nekoliko tisuća čvorova. U spomenutim uvjetima protokoli usmjeravanja postaju izrazito neučinkoviti zbog velikih tablica usmjeravanja i izričito velikog broja mogućih puteva kroz mrežu. Samim time pojavljuju se problemi stvaranja petlji, problemi pronalaska optimalnog puta u mreži i sl. [24]. U tom slučaju pristupa se metodama uvođenja grozdova (engl. *clusters*) gdje se kompleksna topologija generalizira prema topologiji stabla [32].

2.3. Primjene bežičnih senzorskih mreža

Široke primjene bežičnih senzorskih mreža mogu se podijeliti u četiri glavne skupine [33]:

- Nadzor prostora,
- Nadzor objekata,
- Nadzor interakcija između objekata i okoliša te
- Nadzor živih bića [34].

Primjer prve skupine jest nadzor vremenskih čimbenika unutar promatranog okoliša, kao npr. nadzor usjeva i poljoprivrednih kultura, nadzor plinova u rudnicima i odlagalištima, nadzor grijanja i klimatizacije u objektima, inteligentni alarmni sustavi i dr. U današnje vrijeme, primjene BSM-a naglo ulaze posebice na područja kao što su video nadzor, detekcija toksina i oružja u protuterorističke svrhe, nadzor buke i audio nadzor i mnoge ostale aplikacije nadzora prostora [35].

Druga skupina u centar promatranja stavlja specifični objekt, kao npr. strukturalni nadzor točno određene građevine, na način da se na specifičnim mjestima mjere parametri kao što su vibracije, razlika temperature, buka i zvučni artefakti i sl. Isto tako, u ovoj skupini pripada i nadzor specifičnih uređaja i sustava s ciljem procjene ispravnosti istih, nadzor vozila i prometa.

Treća skupina kombinira prethodne dvije skupine gdje se nadziru kompleksne interakcije između objekata i prostora. Primjeri obuhvaćaju detekcije vulkanskih erupcija, detekcije potresa, detekcije eksplozija, nadzor radijacije i mogućih nuklearnih prijetnji, nadzor šumskih požara, taktičko praćenje ciljeva u vojnim svrhama, upravljanje katastrofama i dr.

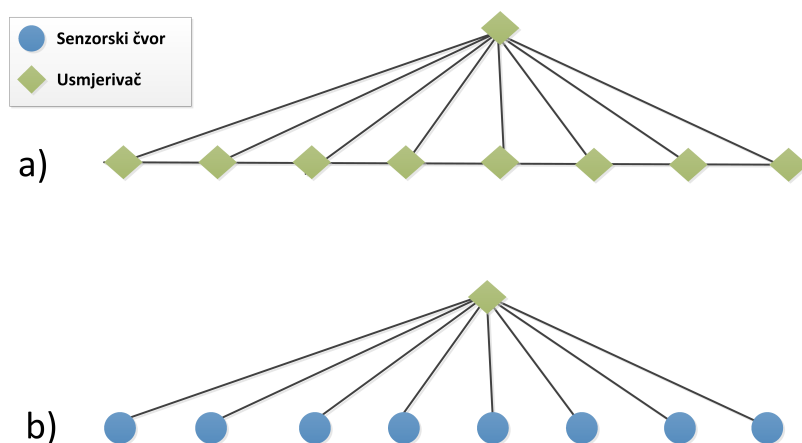
Naposljetku, zadnja skupina obuhvaća nadzor živih bića koji se najčešće provodi s ciljem udaljene medicine, nadzora kritičnih pacijenata, nadzora životinjskog svijeta s ciljem povećanja kvalitete života [1, 29, 34].

2.4. Energetska učinkovitost i potrošnja energije u BSM

Iako koncept BSM-a teži smanjenju potrošnje energije senzorskih čvorova na različite načine, u specifičnim aplikacijama BSM-a potrošnja energije često dolazi u drugi plan. Izravni primjer ove činjenice su vremenski kritične aplikacije (kao što su detekcija požara, potresa, eksplozija, video i audio nadzor) koje postavljaju nove zahtjeve na koncept BSM-a. Tu dolazi do problema potrošnje energije bežičnih čvorova te mogućnosti napajanja čvorova iz baterijskih izvora ili metoda žetve energije. No, kao što je prikazano u poglavlju 2.2 u BSM postoji nekoliko tipova bežičnih čvorova o čemu ovisi i aspekt energetske učinkovitosti (tj. potrošnje energije). U svakoj BSM postoji mini-

malno jedan koordinatorski čvor koji je najčešće napajan iz mreže (ili obnovljivih izvora energije s dovoljnom količinom energije) i nalazi se na postojećoj infrastrukturi. U tom pogledu proučavanje potrošnje energije koordinatorskih čvorova ne predstavlja relevantnu temu.

S druge strane, proučavanje potrošnje energije čvorova koji se nalaze u promatranom području (koji su najčešće napajani baterijski ili metodama žetve energije) aspekt energetske učinkovitosti postaje iznimno bitan. U samom senzorskom polju najčešće nailazimo na dvije vrste čvorova: krajnji čvor i usmjerivač. Kao što je opisano u prethodnom poglavlju, krajnji čvor može u svom radu biti u režimu spavanja sve dok ne detektira događaj iz senzorskog polja, nakon čega detektirani događaj prosljeđuje prema krajnjem odredištu u mreži pomoću usmjerivača. Kada se diskutira o samoj topologiji mreže, moguće je dizajnirati mrežu koja posjeduje samo usmjerivače te oni uz funkciju usmjeravanja obavljaju i senzorsku funkciju. U tom slučaju mreža sadrži veliku zalihost jer čak i u slučaju ispadanja iz funkcije velikog broja čvorova mreža će i dalje obavljati svoju funkcionalnost. Princip rada mreže prikazan je na slici 2.4.



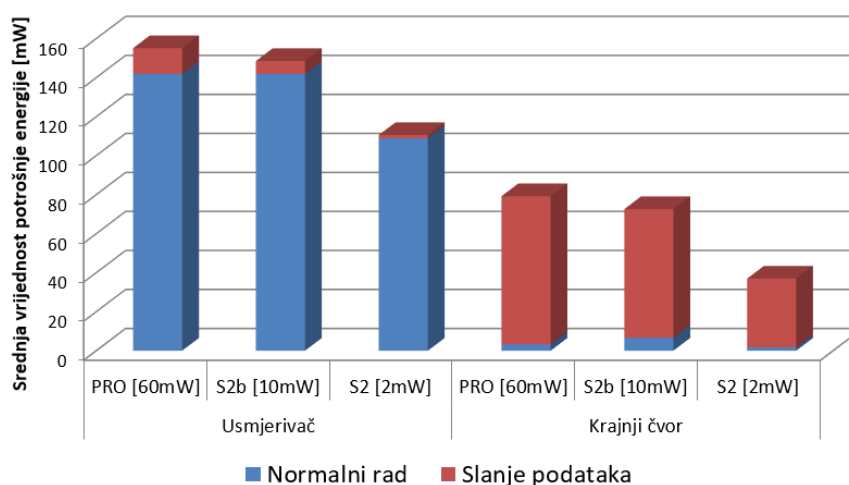
Slika 2.4. Usporedba topologije gdje su svi čvorovi usmjerivači (a) i topologije jednim usmjerivačem (b)

Iako ovaj pristup s jedne strane jamči visoku razinu zalihosti, s druge strane sadrži razne nedostatke. Jedan od nedostataka predstavlja kompleksnost pri usmjeravanju podataka u mreži zbog velikog broja puteva kroz mrežu (pogotovo u velikim mrežama). Nadalje, drugi izričito bitan aspekt predstavlja energetska učinkovitost. Naime, za razliku od krajnjih čvorova koji imaju mogućnost spavanja (čime štede energiju) u klasičnim BSM usmjerivači su stalno aktivni i konstantno troše energiju. Kako bi se prikazao razmjer potrošnje, napravljena su mjerenja potrošnje komercijalnih BSM koji utjelovljuju vrlo popularni i često korišten *ZigBee* protokol komunikacije [36]. Dobivena mjerenja se sastoje od mjerenja potrošnje energije koristeći sustav akvizicije podataka (NI DAQ) te aplikacije na osobnom računalu zadužene za izračun potrošnje energije u jedinici vremena; snaga

P_{avg} . Iznos snage dobiven je integracijom napona i struje u vremenu:

$$P_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt \quad (2-1)$$

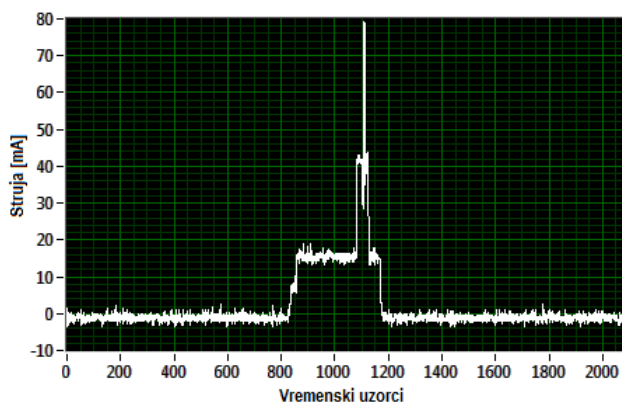
Dobiveni rezultati mjerenja prikazani su na slici 2.5 gdje su prikazana potrošnja za tri različite snage predajnika od 2 mW, 10 mW i 60 mW te za dvije funkcionalnosti uređaja: usmjerivač i krajnji čvor. Također, mjerenja su izvršena u stanju mirovanja te pri slanju podataka (intenzitet prometa $\lambda = 1$ paket/s). Krajnji čvorovi se nalaze u postupku spavanja te se svake sekunde bude kako bi poslali podatak.



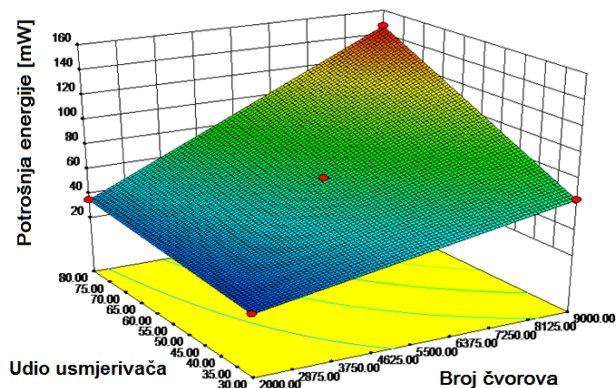
Slika 2.5. Potrošnja energije BSM čvorova za funkcionalnost krajnjeg čvora i usmjerivača

Iz slike 2.5 može se zaključiti kako krajnji čvorovi u mirovanju troše iznimno malo energije dok su neaktivni, dok pri slanju se ta količina energije povećava. Isto tako, usmjerivači za razliku od krajnjih čvorova kontinuirano troše energiju s malom razlikom između perioda slanja i perioda mirovanja. Glavni uzrok tomu jest činjenica da glavnina potrošnje senzorskog čvora otpada na potrošnju mikro-upravljača i potrošnju radio-prijemnika, dok predajnik troši veće količine energije no samo u kratkom vremenu dok se šalju podatci. Spomenuto se može vidjeti iz profila potrošnje energije senzorskog čvora dobivenog pomoću sustava za akviziciju podataka (slika 2.6).

Iz slike 2.6, iznos električne struje BSČ u stanju spavanja se ne mijenja sve do vremena buđenja (uzorak 800). Nakon što se čvor probudi temeljno opterećenje predstavlja mikro-upravljač (16 mA), nakon čega se u uzorku 1070 aktivira radio prijemnik te ukupna potrošnja čvora raste na 42 mA. Ova potrošnja odgovara potrošnji usmjerivača u mirovanju. U postupku slanja podataka BSČ u iznimno kratkom vremenu troši veliku količinu energije te se brzo vraća u početno stanje. Odnos koliko je krajnji čvor u režimu spavanja u odnosu na vrijeme dok je budan definira njegovu



Slika 2.6. Energetski profil bežičnog senzorskog čvora dobiven pomoću sustava za akviziciju podataka



Slika 2.7. Potrošnja energije u ovisnosti o udjelu usmjerivača u mreži i broju čvorova u mreži

prosječnu potrošnju energije naziva se *duty-cycle*. Prema dostupnoj literaturi u današnjim znanstvenim krugovima zajedničko je mišljenje da ciklički način rada (engl. *duty-cycling*) najviše utječe na potrošnju energije te da ostale metode smanjenja potrošnje energije padaju u drugi plan (kao npr. smanjenje snage odašiljača) [37].

Imajući na umu potrošnju usmjerivačkog čvora i potrošnju krajnjeg čvora, broj usmjerivača u mreži definira i ukupnu potrošnju energije BSM-a. Budući da neki protokoli komunikacije definiraju udio usmjerivača u mreži (npr. LEACH protokol [38]) na slici 2.7 prikazana je potrošnja energije mreže s obzirom na udio usmjerivača mreži i ukupni broj čvorova u mreži.

Sukladno opisanom, s ciljem minimalizacije potrošnje energije u BSM teži se smanjenju broja usmjerivača u mreži na način da se očuva postojeća funkcionalnost i zalihost same mreže, te omogućiti skalabilnost i tolerancija mreže na kvarove ključnih čvorova [39].

2.5. Zaključak poglavlja

Bežične senzorske mreže ne sadrže nikakvu infrastrukturu već se sastoje od velikog broja bežičnih senzorskih čvorova koji međusobno čine bežičnu mrežu. Bežični senzorski čvor sastoji se od osjetilnih (mjernih), obradbenih, komunikacijskih blokova i dodatnih blokova. Senzorski modul sadrži osjetilne članove (senzore), jedinica za obradu podataka najčešće predstavlja mikro upravljač, primopredajnik uspostavlja dvostranu bežičnu komunikaciju s ostalim čvorovima dok napajane osigurava električnu energiju čvora.

U BSM postoji najčešće jedno krajnje odredište (engl. *sink node*) prema kojemu su svi podatkovni tokovi usmjereni. Taj čvor se još naziva i krajnji čvor, mrežni koordinator, bazna stanica ili *gateway* uređaj. Ovisno o primjeni BSM-a one mogu tvoriti različite topologije mreže i to su najčešće topologija zvijezde, topologija stabla i mješovita topologija.

Problem BSM-a predstavlja ograničenost resursa na temelju čega je potrebno izgraditi funkcionalnu bežičnu mrežu. Glavne razlike bežične senzorske mreže i klasičnih računalnih mreža mogu se prikazati kroz ograničenost resursa, neujednačen i mješovit promet, zalihost podataka, dinamičnost mreže, heterogenost mreže, balansiranje potrošnje energije, skalabilnost i nekoliko odredišta podatkovnih tokova.

Široke primjene bežičnih senzorskih mreža mogu se podijeliti u četiri glavne skupine i to nadzor prostora, nadzor objekata, nadzor interakcija između objekata i okoliša te nadzor živih bića. Nove primjene BSAM često zahtijevaju malo kašnjenje i kolebanje kašnjenja, veliku brzinu prijenosa podatka te malu učestalost pogreške, što ne odgovara konceptu BSM-a. Zbog spomenutih zahtjeva pojavljuju se nove vrste bežičnih senzorskih mreža kao što su bežične senzorske i aktor-ske mreže (BSAM, engl. *Wireless Sensor and Actuator Networks*, WSAN) koje sadrže i djelatne elemente, čime se omogućuje i djelovanje na promatrani okoliš.

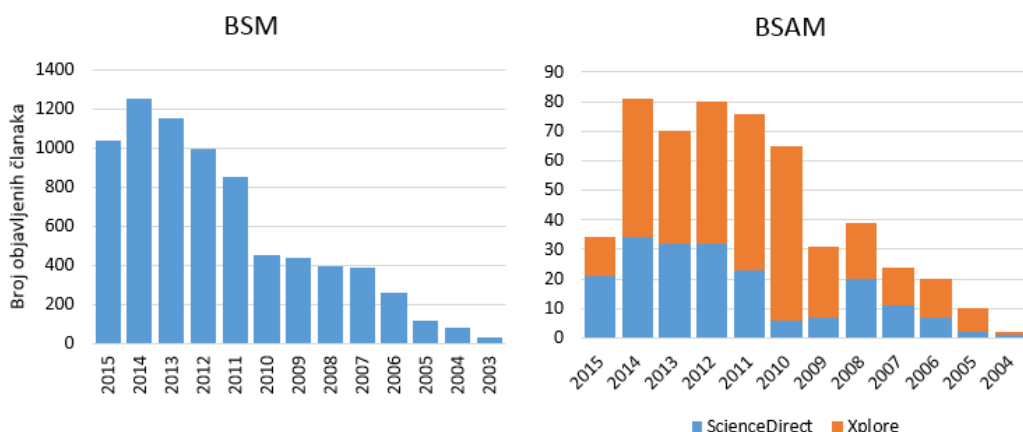
3. BEŽIČNE SENZORSKE I AKTORSKE MREŽE (BSAM)

Razvojem BSM-a i novih tehnologija, bežični senzorski čvorovi postaju sve manji, napredniji i učinkovitiji sa sve više funkcionalnosti. No koncept bežičnih senzorskih mreža nije bez mana. Zbog različitosti BSM-a od klasičnih računalnih mreža (kao što je dinamička topologija, bežična komunikacija, nesimetrični promet, redundancija podataka, ograničenost resursa, veliki broj skokova usmjeravanja itd.) pojavljuju se mnogi problemi koji i danas nisu otklonjeni. Jedan od problema uključuje ograničenu količinu energije te ograničenu mogućnost obrade podataka, što ih razlikuje od klasičnih računalnih mreža. Zbog male cijene izrade te široke primjene bežičnih senzorskih čvorova danas se pojavljuju bežične senzorske mreže s izrazito velikim brojem senzorskih čvorova, koji se kreće čak do nekoliko tisuća čvorova u mreži [40]. U takvim velikim mrežama čak i jednostavne funkcionalnosti kao što su slanje podataka od izvora do odredišta su otežane, pogotovo uzimajući u obzir nepouzdanost same radio komunikacije, zbog čega se i danas provode istraživanja ovih mreža.

Iako su današnje bežične tehnologije razvijene do iznimno visoke razine, postoje primjene u kojima bežična komunikacija i dalje ne pruža dovoljnu kvalitetu usluge (QoS). Primjer je primjena u industrijskim postrojenjima, gdje se zahtijeva izričito visoka pouzdanost te ograničenje na kašnjenje prijenosa podataka kroz mrežu. U ovoj primjeni spominje se novi koncept Industrije 4.0 (engl. *Industry 4.0*) koji proširuje postojeće spoznaje Interneta objekata (IoT) i BSM-a u novi koncept koji zagovara pouzdano stvarno-vremensku komunikaciju primjenjivu u industriji [41].

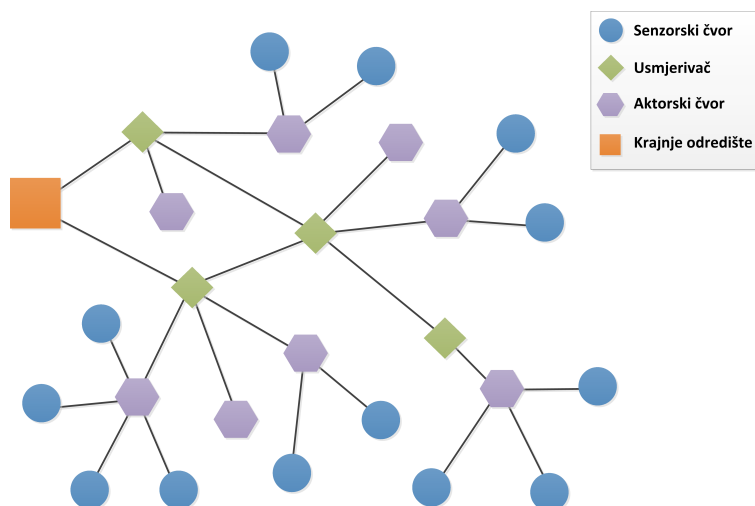
Dosad vrlo poznate strukture i mreže sa sensorima (koje za cilj imaju prikupljanje podataka iz promatranog okoliša) zbog potrebe nadolazećih primjena počinju prelaziti u napredne i kompleksne mreže. Tu se osim uobičajenih veličina koje senzorski čvorovi mjere (kao npr. temperatura, intenzitet svjetlosti, vibracije, zvuk, zračenje i sl.) počinje ukazivati potreba i na mogućnost djelovanja na promatrani okoliš. Pri tome, osim senzora, unutar čvora se pojavljuju aktorski (engl. *actor, actuator*) element, koji predstavljaju djelatni element dosad samo senzorske mreže. Ovo predstavlja odstupanje od ideje klasične BSM, stoga se ove vrste bežičnih senzorskih mreža (koja uz osjetni element uključuje i djelatni element) nazivaju **Bežične Senzorske i Aktorske Mreže, BSAM**. Ove mreže imaju mogućnost fizičke akcije na dobiveni podražaj od senzora [42, 43].

Bežične senzorske i aktorske mreže, kao koncept, postoje manje od 10 godina, što ih čini lukrativnim područjem istraživanja. Ovo potvrđuje i činjenica da je u proteklih 15 godina iz područja bežičnih senzorskih mreža (BSM) objavljeno više od 62000 članaka, dok je iz područja BSAM-a



Slika 3.1. Broj objavljenih članaka iz područja BSM i BSAM proteklih godina u bazama Sciencedirect i IEEE Xplore

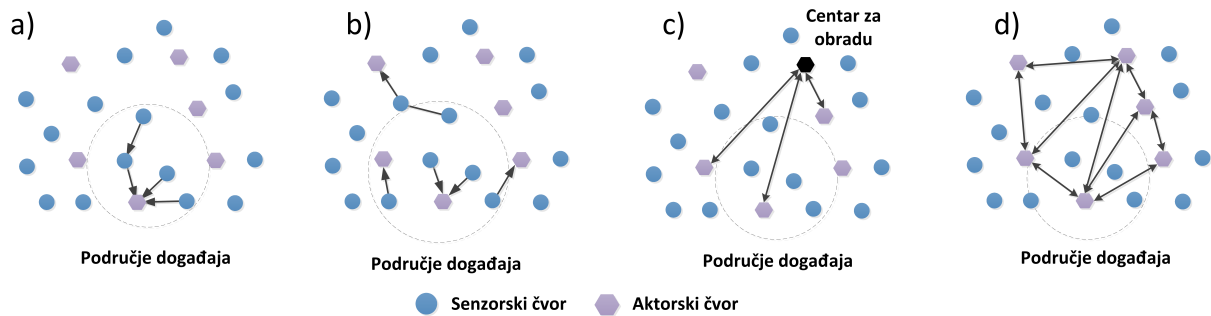
objavljeno svega 500 članaka (u bazama Sciencedirect i IEEE Xplore, zaključno s 2015. godinom). Prikaz broja objavljenih članaka prikazan je na slici 3.1.



Slika 3.2. Primjer topologije bežične senzorske i aktorske mreže - BSAM

Zbog specifičnosti same konfiguracije mreže postojeći protokoli i algoritmi iz BSM nisu u potpunosti primjenjivi na područje BSAM, što iziskuje potrebu za razvojem novih protokola i standarda [44, 45]. BSAM se razlikuju od BSM u nekoliko bitnih segmenata, a osnovna topologija BSAM prikazana je na slici 3.2 [44]. U usporedbi sa BSM, glavnu razliku čine njezini aktorski čvorovi, koji osim senzorskog elementa sadrže i djelatni element. Ovisno o tipu konfiguracije čvorovi u BSAM mogu biti samo senzorski, samo aktorski ili kombinacija ovih funkcionalnosti. Isto tako, općenito postoje dvije arhitekture BSAM-a i to: potpuno automatska arhitektura i polu-automatska arhitektura. U potpuno automatskoj arhitekturi aktorski čvorovi komuniciraju međusobno bez izravne veze s centralnim koordinаторom mreže, dok u polu-automatskoj arhitekturi komunikacija se odvija preko koordinатора mreže [46]. Polu-automatska arhitektura posjeduje karakteristike

koje su najbližije BSM-u, no ipak zbog specifičnosti komunikacije BSAM postavlja se pitanje primjene komunikacijskih protokola iz BSM-a u BSAM, što iziskuje dodatno istraživanje [42, 44].



Slika 3.3. Načini koordinacije u BSAM: Sensor-aktor koordinacija; (a) jedan aktor, (b) više aktora; Aktor-aktor koordinacija: (c) centralizirana, (b) distribuirana [46]

U BSAM susreće se problem koordinacije, gdje se definira na koji način se odvija komunikacija u mreži tj. kako se koordiniraju senzorski i/ili aktorski čvorovi. U određenim arhitekturama mreže koordinacija može biti centralizirana, dok u drugim arhitekturama je distribuirana. Načini koordinacije u BSAM se mogu podijeliti u dvije skupine (slika 3.3):

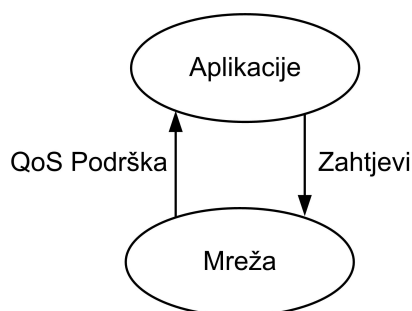
- **Senzor-aktor koordinacija** - senzori odabiru aktor prema kojemu šalju podatke.
- **Aktor-aktor koordinacija** - aktori međusobno komuniciraju i razmjenjuju informacije.

Zbog činjenice da su primjene BSAM-a vrlo široke, različite aplikacije postavljaju specifične zahtjeve na mrežu. Jedan od čestih zahtjeva na BSAM jest podrška kvaliteti usluge (QoS) za potrebe stvarno-vremenske i pouzdane komunikacije. Iznimno je bitno da određeni podatci budu proslijeđeni točno određenom aktoru s velikom pouzdanošću, u najkraćem vremenu [47, 48]. Ovo predstavlja problem uspostave QoS u BSAM te potrebom za diferencijacijom usluga u ovisnosti o traženoj klasi usluge.

Jedna od primjena BSAM leži u industrijskim postrojenjima gdje se zahtijeva izričito visoka pouzdanost te ograničenje kašnjenja u mreži. U ovoj primjeni spominje se novi koncept Industrije 4.0 (engl. *Industry 4.0*), gdje dolazi do integracija Interneta objekata i industrijske automatizacije. U ovom okviru iznimno je važno omogućiti vrlo mala kašnjenja, vrlo visoku pouzdanost i sigurnost komunikacije te učinkovitu povezanost velikog broja uređaja u mreži. No zbog raznolikih zahtjeva na mrežu i velikog broja otvorenih problema područja istraživanja trenutno predstavlja samo koncept u razvoju, čime se omogućuje predlaganje novih rješenja u postupku rješavanja otvorenih problema istraživanja i ostvarivanja funkcionalnog sustava.

3.1. Problematika podrške kvaliteti usluge (QoS) u BSAM

Ne postoji jedinstvena definicija kvalitete usluge, ali postoji nekoliko definicija koje opisuju tehničke karakteristike prijenosa poruka ovisno o mrežnoj infrastrukturi i vrsti aplikacija. Prema RFC2386 kvaliteta usluge predložuje se kao niz uvjeta koje je potrebno zadovoljiti u procesu slanja paketa od izvora do odredišta [49]. Isto tako, QoS se može opisati kao skup kvalitativnih i kvantitativnih obilježja koji su neophodni za postizanje željene funkcionalnosti aplikacije [50]. Ideja kvalitete usluge se može prikazati kao jednostavan QoS model (slika 3.4) [15].



Slika 3.4. Jednostavni model kvalitete usluge (QoS) u mreži

Kvaliteta usluge kao koncept oslanja se na nekoliko osnovnih metrika koje najviše utječu na performanse i koje se koriste u postupku ispitivanja pružanja QoS-a. Glavni parametri (metrike) koji definiraju kvalitetu usluge u mrežama su [2, 13]:

1. **Propusnost** (engl. *throughput*) - broj informacijskih bitova u jedinici vremena primljenih na odredištu. Ova metrika iznimno je važna za stvarno vremenske primjene (npr. multimedijске aplikacije i sl.), dok za spore procese kao npr. udaljeno mjerenje okolišnih parametara nije presudna. Propusnost se definira na aplikacijskom sloju i definira maksimalni broj informacijskih bitova u jedinici vremena koju aplikacija može koristiti. Ovdje treba razlikovati propusnost komunikacijskog kanala koja se definira na fizičkoj razini i za standard IEEE 802.15.4 iznosi 256 kbit/s na fizičkom sloju.
2. **Kašnjenje** (engl. *latency*)- vrijeme između slanja podatkovnog paketa na izvoru i primanja na odredištu. Ova metrika je vrlo često korištena prvenstveno radi novih aplikacija koje zahtijevaju malo vrijeme propagacije (kašnjenje) podataka u mreži. Na ovu metriku utječe veliki broj parametara, a najvažniji parametar je broj skokova u mreži. U određenim aplikacijama i modelima komunikacije ova metrika se može prenijeti u metriku vremena odziva, koja definira vrijeme potrebno da se podatak proslijedi na odredište zajedno s vremenom potrebnim da se potvrda proslijedi natrag senzorskom čvoru.

3. **Učestalost pogreške** (engl. *error rate*) - definira se kao omjer paketa koji nisu stigli na odredište i ukupnog broja poslanih paketa. Iako jednostavna, ova metrika je iznimno važna za mreže koje zahtijevaju veliku pouzdanost komunikacije te ovisi o raznim parametrima u mreži. Iz učestalosti pogreške može se definirati pouzdanost komunikacije koja definira vjerojatnost da se podatak uspješno proslijedio kroz mrežu.
4. **Kolebanje kašnjenja** (engl. *jitter*) - devijacija u kašnjenju između dva slanja iznimno je bitna za slanje multimedijskog sadržaja kroz mrežu, čime se u konačnici smanjuje potrebna veličina među spremnika (engl. *buffer*) za mreže s malom vrijednosti kolebanja kašnjenja.
5. **Energetska učinkovitost** - u posljednje vrijeme energetska učinkovitost se također uzima kao metrika kvalitete usluge, gdje je u konačnici cilj minimizacija potrošnje energije uz maksimizaciju kvalitete usluge. Iako su ovi pojmovi oprečni, za specifične aplikacije mogući je određeni kompromis između navedenih veličina, što je ostvarivo kroz diferencijaciju usluga (engl. *service differentiation*) unutar mreže.

3.2. Pregled područja i otvorenih problema kvalitete usluge u BSAM

Područje BSM i BSAM-a razvija se više od 30 godina, no prema današnjem stanju područja potrebno je još pet do deset godina kako bi koncept BSAM zaživio kao komercijalna i pouzdana tehnologija [45, 51]. Jedan od temeljnih problema BSAM-a jest nedostatak podrške kvaliteti usluge (QoS), primarno zbog naravi bežične komunikacije. Trenutno, QoS u BSAM predstavlja nedovoljno istraženo područje [15].

Problem QoS u BSAM-u je problem koji se promatra s različitih slojeva protokolnog stoga, no globalni konsensus jest da podsloj pristupu mediju (engl. *Medium Access Control*, MAC) i protokol usmjeravanja na mrežnom sloju najviše utječu na kvalitetu usluge u bežičnoj senzorskoj (i aktorskoj) mreži [12, 13, 16]. Budući da kvaliteta usluge u BSAM ovisi o raznim čimbenicima u postupku pružanja QoS u BSAM iznimno je važno obuhvatiti sve slojeve protokolnog stoga kroz pristup međuslojne optimizacije tj. poprečnim dizajnom slojeva (engl. *cross-layer approach*) [17]. S te strane, bitno je razmotriti i problem QoS-a u BSAM koje su proizašle iz BSM koncepta.

Kvalitetu usluge u BSAM je moguće sagledati s nekoliko aspekata, što uključuje sljedeće komponente koje omogućuju QoS [52]:

- **Programska apstrakcija i međusloj** (engl. *middleware*) - obuhvaća metodu i način pojednostavljenja postupka razvoja aplikacija za BSAM koristeći postojeće programske alate i razvojna okruženja. Ovaj segment neće biti razmatran u okviru ove disertacije.

- **Podsloj pristupa mediju i MAC protokoli** - obuhvaća način pristupa dijeljenom RF mediju sa strane senzorskog čvora,.
- **Mrežni sloj i protokol usmjeravanja** - prikazuje način učinkovitoga dostavljanja podataka od izvora do odredišta.
- **Hibridni protokoli** - uključuju međuslojni pristup tj. poprečni dizajn slojeva (engl. *cross-layer*) i postupke međuslojne optimizacije te obuhvaćaju fizički sloj, podsloj pristupa mediju, mrežni sloj i aplikacijski sloj s ciljem optimizacije komunikacije.

3.2.1. Podsloj pristupa mediju - MAC

Podsloj pristupa mediju definira adresiranje čvorova te način na koji se pristupa komunikacijskom, radio-frekvencijskom mediju u bežičnoj komunikaciji. Kako BSAM predstavljaju relativno novo područje, postoji izrazito malo MAC protokola koji su izravno osmišljeni za BSAM. Zbog spomenutog, moguće je izdvojiti nekolicinu protokola koji udovoljavaju potrebama BSAM, iako su osmišljeni za BSM. Ti protokoli uključuju S-MAC (T-MAC i B-MAC), DMAC, PEDAMACS, Z-MAC, IEEE 802.15.4, Q-MAC, MMAC, Dual Mode MAC i PQMAC. Njihov pregled prikazan je u tablici 3.1 [51].

Tablica 3.1. Protokoli pristupa mediju (MAC) u bežičnim senzorskim i akterskim mrežama (BE: usluga najbolje namjere, *best effort*, HRT: čvrsta usluga, *hard real time*, ENE: energetska učinkovitost, SC: skalabilnost, ++: visoka, +: dobra, +/-: umjerena, -: loša)

Ime	Tip	QoS	Topologija	ENE	Klase	SC
S,T,B-MAC	CSMA/CA	BE	ne	++	ne	+
DMAC	slotted contention-based	BE	stablo	+	ne	+
Z-MAC	Hibridni (CSMA, TDMA)	BE	ne	++	ne	+
PEDAMACS	TDMA	HRT	ne	++	ne	-
MMAC	Hibridni (sl. cont.-based, TDMA)	BE	ne	++	ne	+
Q-MAC	CSMA/CA	BE	ne	++	da	+
DM MAC	Hibridni (FDMA, TDMA)	HRT	ćelije	N/A	ne	+/-
IEEE 802.15.4	slotted CSMA/CA, GTS	BE/HRT	ne	+	da	+
QoS-based MAC	CSMA/CS	BE	ne	++	da	+
PQMAC	CSMA/CA	BE	ne	++	da	+

Jedan od najviše zastupljenih MAC protokola u BSM i BSAM jest **S-MAC** protokol. Ovaj protokol predlaže ciklički način rada (engl. *duty-cycling*), adaptivno slušanje, prosljeđivanje poruka i ostale mehanizme, s ciljem poboljšanja energetske učinkovitosti u usporedbi s IEEE 802.11

standardom. Spavanje pomoću cikličkog načina rada omogućeno je koordinacijom između čvorova, čime se poveća energetska učinkovitost, no povećava se i kašnjenje, što ovaj protokol rješava implementacijom adaptivnog slušanja (susjedni čvorovi slušaju okolne čvorove kratki dio vremena, umjesto da stalno spavaju). Povećanje energetske učinkovitosti utječe na propusnost koja se smanjuje. T-MAC na sličnom principu povećava energetska učinkovitost, no također smanjuje propusnost, dok B-MAC poboljšava propusnost u usporedbi s njegovim prethodnicima [53].

DMAC protokol je MAC protokol optimiziran za prikupljanje podataka u topologiji stabla. Ciklički način rada se kod ovog protokola dinamički prilagođava opterećenju na način da raspoređuje u vremenskim intervalima senzore na vrhu grana stabla, izuzimajući iz intervala senzore koji spavaju. Ovaj protokol više je prilagođen komunikacijskom modelu klasičnih BSM (slanje podataka od senzora do krajnjeg odredišta u mreži) [54].

PEDAMACS protokol je temeljen na vremenskom multipleksu (TDMA) za mreže s više skokova gdje se pomoću baznih stanica velikih snaga čvorovi u mreži sinkroniziraju. Ovdje je pokazano da se energetska učinkovitost i kašnjenje mogu povećati/smanjiti u usporedbi s tradicionalnim MAC protokolima bez postupaka spavanja, no centralizirani pristup s pristupnom točkom koja ima izravnu vezu sa svim čvorovima nije pristup primjenjiv u realnim uvjetima [55].

Z-MAC protokol s druge strane koristi hibridni pristup s vremenskim intervalima koji su točno dodijeljeni određenom čvoru. Drugi čvorovi se mogu ubaciti u spomenuti interval ovisno o uvjetima u mreži. U slučaju malog zagušenja mreža se ponaša kao CSMA dok se kod velikog opterećenja koriste vremenski odsječci (slotovi). Z-MAC pokazuje bolje performanse u slučajevima velikog prometa u mreži na uštrb energetske učinkovitosti - kompromis (engl. *trade-off*) [56].

IEEE 802.15.4 je standard koji definira fizički sloj i podsloj pristupu mediju za BSM [57]. On koristi CSMA/CA algoritam pristupu mediju u dva načina rada: rad s sinkronizacijskim impulsom (engl. *beacon enabled*), gdje se koristi CSMA/CA s vremenskim odsječcima (engl. *slotted CSMA/CA*) i rad bez sinkronizacijskog impulsa (engl. *non-beacon enabled*), gdje se koristi klasični CSMA/CA. Isto tako, standard definira komunikaciju na fizičkom sloju u frekvencijskom opsegu od 2.4 GHz i maksimalni kapacitet kanala na fizičkom sloju od 250 kbit/s. Kao standard koriste ga razni protokoli više razine kao npr. *ZigBee* protokolni stog i sl. Podršku kvaliteti usluge omogućuje putem GTS vremenskih okvira u radu sa sinkronizacijskim impulsom [36].

QoS-based MAC protokol također koristi CSMA/CA pristup mediju koji se prilagođava aplikativno specifičnoj QoS uz očuvanje energetske učinkovitosti. Ovo se ostvaruje na način da se dinamički skalira veličina prozora natjecanja (engl. *contention window*) u ovisnosti o prometu

i karakteristikama komunikacijskog kanala, dok se cikličkim načinom rada smanjuje potrošnja energije - diferencijacija usluga u ovisnosti o klasi [58].

PQMAC protokol je prioritetni MAC protokol gdje se definira prioritet podacima u ovisnosti o zahtjevima. Prioritetni podatci se šalju brže zbog povećanog perioda slušanja kanala koristeći naprednu tehniku buđenja, koja ovisi o prometu u mreži [59].

Q-MAC definira diferenciranje usluga koristeći prioritete. Prioritet se definira svakom paketu na temelju njegovog sadržaja, broja skokova koje je prošao u mreži i metrike potrošnje energije. Komunikacija među čvorovima se ostvaruje koristeći princip natjecanja s RTS-CTS fazom. Rezultati pokazuju kako je energetska učinkovitost ovog protokola gotovo jednaka kao kod S-MAC protokola ali se ostvaruje fleksibilna diferencijacija klasa prometa [60].

MMAC protokol je jedan od rijetkih MAC protokola koji uzima u obzir mobilnost čvorova. Ovdje se koristi metoda raspoređivanja pristupa mediju (engl. *scheduling*) koji definira vremenske periode kad čvorovi pristupaju mediju na temelju podataka o prometu u mreži i načinu gibanja čvorova - čvorovi su svjesni svoje lokacije. Na temelju lokacije predviđa se kretanje čvorova čime se ugađaju vremena trajanja okvira, slučajnog pristupa mediju i sl. Ovaj protokol daje slične rezultate kao i srodni protokoli (S-MAC) kada nema mobilnosti, dok u slučaju mobilnosti prikazuje poboljšanje [61].

DM MAC (*Dual mode realtime MAC*) funkcionira u dva režima rada: U zaštićenom načinu rada mreža je podijeljena u ćelije što predstavlja mehanizam komunikacije bez kolizija, a struktura ćelija se definira pri inicijalizaciji. S druge strane, u nezaštićenom načinu rada brzina prijenosa prema koordinatoru je optimalna ali postoji mogućnost kolizije. Pri inicijalizaciji mreža radi u nezaštićenom načinu rada ali se može prebaciti u zaštićeni način rada, s obzirom na broj kolizija. Ovaj način prebacivanja jamči ograničenje na najveće kašnjenje sa solidnim performansama, no čvorovi moraju sadržavati informaciju o lokaciji što predstavlja nedostatak [62].

Na temelju iznesene analize može se zaključiti kako većina MAC protokola podržavaju samo uslugu najbolje namjere (engl. *best effort*), dok samo mali broj protokola jamči ograničenje na najveće kašnjenje - HRT. Oni protokoli koji jamče HRT su protokoli koji su građeni na strukturi ćelija i zahtijevaju pristupne točke velikih snaga radi sinkronizacije mreže. Ovo predstavlja problem u velikim mrežama zbog nemogućnosti pokrivanja cijele površine BSAM s jednom pristupnom točkom velike snage - veliko područje pokrivanja.

Nadalje, bitni aspekt BSAM jest mobilnost, zbog činjenice da aktori i senzori mogu putovati u dinamičkim mrežama kao što su industrijske primjene. Većina postojećih MAC protokola ne

podržavaju mobilnost (osim MMAC protokola) stoga postoji potreba za razvojem protokola koji može podržavati mobilnost u BSAM. S druge strane, IEEE 802.15.4 predstavlja svestrano rješenje i standard komunikacije koji može udovoljiti komunikacijskim zahtjevima u BSAM. No, njegove prednosti dolaze uz cijenu umjerene energetske učinkovitosti, što predstavlja kompromis. Upitno i dalje ostaje kako se ovi MAC protokoli mogu nositi s novim aplikacijama i novim modelima komunikacije i koordinacije u BSAM, što je potrebno detaljno i sustavno analizirati.

3.2.2. Mrežni sloj - protokol usmjeravanja

Mrežni sloj čini treći sloj u OSI modelu i zadužen je za ostvarivanje komunikacije s kraja na kraj. U topologijama sa višestrukim skokovima potreban je učinkovit protokol usmjeravanja kako bi se podatak uspješno poslao s kraja na kraj mreže. Zbog činjenice da je područje BSAM relativno novo područje, postoji mali broj protokola usmjeravanja koji su specifično dizajnirani za BSAM. Stoga, veliki broj korištenih protokola proizlazi iz BSM-a. Općeniti prikaz protokola usmjeravanja u BSAM proizašlih iz BSM je prikazan u tablici 3.2 [51].

Tablica 3.2. Protokoli usmjeravanja u bežičnim senzorskim i akterskim mrežama (SRT: *soft real time*, EN: potrošnja energije, D: kašnjenje, R: pouzdanost, ER: učestalost pogreške, C: pokrivenost, M: mobilnost, ENE: energetska učinkovitost, SC: skalabilnost, ++: visoka, +: dobra, +/-: umjerena, -: loša)

Ime	RT	EN	D	R	ER	C	M	ENE	SC
SAR	SRT	✓							-
SPEED	SRT		✓						+
MMSPEED	SRT		✓	✓					+
REINFORM	SRT			✓				-	+
Energy-Aware QoS Routing	SRT	✓	✓		✓			++	-
DAPR	SRT	✓				✓		+	-
SOMDV-R	SRT			✓				+/-	-
Hierarchical routing for pipelines	SRT			✓					+
Dwarf	SRT	✓	✓	✓				++	+/-
Predictive QoS routing	SRT						✓		+

Iz prikazanih protokola usmjeravanja treba izdvojiti **SPEED** kao jedan od najviše istraženih protokola usmjeravanja [63]. SPEED je lokalizirajući algoritam usmjeravanja koji koristi informaciju o položajima čvorova kako bi što kraćim putem dostavio podatak na krajnje odredište, u što kraćem vremenu, čime osigurava stvarno-vremensku komunikaciju. U slučaju zagušenja odabire

se alternativni put kroz mrežu kako bi se zagušenje smanjilo. Problem SPEED protokola je što ne pruža garanciju isporuke paketa, što rezultira gubitkom paketa u mreži. MMSPEED protokol proširuje inicijalni SPEED algoritam uključujući i pouzdanost komunikacije. On razbija mrežu na nekoliko nezavisnih SPEED mreža gdje se paketi klasificiraju ovisno o prioritetu. S druge strane, MMSPEED ne uzima u obzir MAC protokol koji je potreban kako bi se ostvario prioritetni pristup mediju i sl.

SAR protokol nastoji odabirom optimalnog puta prema krajnjem odredištu u mreži jamčiti QoS na način da se za svaki paket poslan kroz mrežu računa metrika QoS. Ova metrika uzima u obzir energetske učinkovitost, kašnjenje i prioritet paketa. Krajnji cilj SAR algoritma je produžiti životni vijek mreže [64].

Osim ovih osnovnih protokola postoji još nekolicina protokola usmjeravanja koji na sličan način (koristeći prioritete, lokaciju ili hijerarhiju) pokazuju poboljšanje u segmentu energetske učinkovitosti, pouzdanosti, ili neku drugu QoS metriku. Pogledom na tablicu 3.2 vidljivo je da niti jedan od postojećih BS(A)M protokola ne pruža pouzdanost komunikacije s pogledom na kašnjenje, energetske učinkovitost i mobilnost, što je iznimno bitno u BSAM. S druge strane, u zadnjih nekoliko godina pojavljuju se protokoli usmjeravanja izravno dizajnirani za BSAM.

Protokol **LRP-QS** je dizajniran izravno za BSAM koji pretpostavlja da je lokacija čvorova poznata *a priori*, i ne uzima u obzir MAC podsloj kao dio protokolnog stoga. Također, predloženi protokol nije uspoređen u eksperimentalnim uvjetima kako bi se pokazala njegova prednost naspram konkurentnih rješenja [65, 66].

Veliki broj protokola u ovom pregledu ne uzima u obzir MAC podsloj te su protokoli usmjeravanja modelirani kao matematički modeli kroz teoriju grafova. Također, velika većina ovih protokola je osmišljena za BSM s mogućnošću primjene na BSAM, no njihova izravna primjena u BSAM nije eksperimentalno provjerena. Nadalje, mali broj protokola uzima u obzir mobilnost čvorova (ili ako uzima u obzir mobilnost ne uzima u obzir QoS) što predstavlja problem područja. Isto tako, većina postojećih protokola su geografski protokoli koji uzimaju u obzir da je geografski položaj čvorova i aktera poznat *a priori*, što u stvarnim primjenama nije slučaj, jer čvorovi najčešće nisu opremljeni s lokacijskim uređajem (kao npr. GPS, engl. *Global Positioning System*). Razlog tomu jest povećana potrošnja energije čvora i poskupljenja izvedbe istog u slučaju korištenja lokacijskog uređaja. Naposljetku, u nadolazećim novim primjenama i novim komunikacijskim modelima BSAM-a koji planiraju mreže s iznimno velikim brojem čvorova (1000 i više) postavlja se pitanje ponašanja i skalabilnosti postojećih protokola za spomenute primjene.

3.2.3. Hibridni protokoli - međuslojni pristup

Kako bi se ostvarila QoS u BSAM mora postojati učinkovito upravljanje resursima. U svrhu optimizacije upravljanja resursima u novije vrijeme predlaže se međuslojni pristup i međuslojna optimizacija, tj. poprečni dizajn slojeva (engl. *cross-layer*). Ovaj pristup omogućuje simultani pristup svim slojevima protokolnog stoga kako bi se što učinkovitije raspoređivali resursi i upravljalo fizičkim slojem, pristupom mediju, usmjeravanjem i samoj aplikaciji koja se primjenjuje [67].

U ovom pogledu, hibridni pristup i hibridni protokoli obuhvaćaju više slojeva po međuslojnom principu u cilju poboljšanja učinkovitosti komunikacije. U BSAM postoji iznimno malo hibridnih protokola koji su izravno osmišljeni za BSAM (DEAR), a iz područja BSM s mogućnošću primjene u BSAM se ističu LEACH i RAP.

RAP predlaže arhitekturu za stvarno-vremensku komunikaciju za velike mreže koja pruža MAC podršku, protokol usmjeravanja, transportni sloj i aplikacijski sloj. Kako bi se omogućila prioritizacija paketa na MAC razini on koristi proširenja IEEE 802.11 standarda za bežičnu komunikaciju. Mrežni sloj je geografski orijentiran - svjestan lokacije. Lokacija se koristi za uspostavljanje učinkovite trase od izvora do odredišta na "pohlepan" način (engl. *greedy*). Dodjeljivanjem vremenskih termina omogućuje se podrška QoS-u. Princip usmjeravanja koristi metriku brzine propagacije paketa kroz mrežu te na temelju potrebne brzine određuje optimalni put na temelju prioriteta. Skalabilnost ovog protokola je umjerena [68].

LEACH [38] je algoritam koji cilja smanjenju potrošnje energije na način da se jednolično distribuira opterećenje među čvorovima. Uvođenjem grozdova i koordinatora grozda smanjuje se kompleksnost usmjeravanja, a položaj grozdova se rotira kako bi se očuvala energetska učinkovitost mreže. Čvor odlučuje želi li biti koordinator grozdova s određenom vjerojatnošću. Nakon uvođenja grozdova koordinatori grozdova uspostavljanjem vremenskog multipleksa (TDMA) diktiraju čvorovima kad mogu slati podatke.

Autori u radu [42] istražuju činjenicu kako veliki broj protokola osmišljenih za BSM nisu izravno primjenjivi u BSAM i predlažu **DEAR** protokol usmjeravanja za BSAM koji se temelji na hijerarhijskoj strukturi grozdova čime se smanjuje potrošnja energije. Algoritam se temelji na dva segmenta: centraliziranom i decentraliziranom djelovanju, u ovisnosti o tome da li je koordinator mreže prisutan. Ukoliko je koordinator mreže prisutan promet se prosljeđuje prema njemu, dok se u suprotnoj situaciji promet prosljeđuje izravno u mrežu. Rezultati simulacije potvrđuju kako velika većina paketa dolazi na odredište unutar prije definiranog vremena sa visokom vjerojatnošću.

Međuslojni pristup problemu QoS-a (poprečnim dizajnom slojeva) je daleko najmanje istražen,

no predstavlja iznimno bitan segment BSAM jer omogućuje spregu svih slojeva protokolnog stoga, u zajedničkom cilju optimizacije performansi mreže. Treba napomenuti kako izrazito mali broj međuslojnih pristupa podržava zahtjeve novih BSAM kao što su visoka pouzdanost, mobilnost, redundancija, itd. No i dalje preostaje problem postojećih protokola, a to je potreba za poznavanjem lokacije čvorova. Ova pretpostavka nije ostvariva pretpostavka primarno zbog činjenice da informacija o lokaciji koristi previše resursa za energetski ograničene čvorove i za čvorove postavljene unutar zatvorenih prostora (npr. u industrijskim primjenama).

3.3. Primjene BSAM sa podrškom kvaliteti usluge

U proteklih desetak godina područje BSAM se naglo razvija te u djelokrug dolaze razne primjene bežičnih senzorskih i aktorskih mreža. Podrškom kvaliteti usluge otvaraju se široke mogućnosti za primjenu BSAM u gotovo svim segmentima društva. Tako se razvojem BSAM otvaraju sljedeća područja primjene BSAM-a sa podrškom kvaliteti usluge [46, 69, 70]:

- **Zdravstvo i nadzor pacijenata** - U području zdravstva i nadzora pacijenata pojavljuje se mogućnost ne samo nadzora pacijenata nego i reakcije na nastale situacije. Primjenom BSAM sa podrškom QoS moguće je u stvarnom vremenu vršiti nadzor i reakcije u kritičnim situacijama. Ovim se ostvaruje zdravstvo visoke razine te je moguće ostvariti puno brže vrijeme odziva za kritične pacijente. Od specifičnih primjena tu je nadzor srčanih bolesnika te bolesnika koji borave na intenzivnim jedinicama.
- **Kontrola i praćenje životinja** - Primjena BSAM u za praćenje i kontrolu životinja uključuje različite primjene, od kojih jedna uključuje nadzor životinja na farmama. Točnije, u radu [71] autori predlažu sustav za nadzor bikova i njihovih borbi, kako bi smanjili ozljede koje si bikovi nanose ukoliko započnu sa fizičkim okršajem. U ovim primjenama brzina odziva je vrlo bitna te je maksimalno dozvoljeno kašnjenje definirano reda veličine od 500 ms.
- **Promet** - Ova primjena vrlo je zastupljena u MANET i BSM mrežama, gdje je upotrebom senzora vršen nadzor prometa u gradovima [72]. Pojavom BSAM mreža omogućuje se ne samo nadzor nego i djelovanje tj. u ovom slučaju upravljanje prometom koristeći samu bežičnu infrastrukturu. U ovim primjenama tolerira se kašnjenje za kritične scenarije koje se kreće oko 2 sekunde.
- **Pametne kuće - Automatizacija u kućama** - Iako su BSM vrlo često korištene u sustavima pametnih kuća i automatizacije u kućama, one su primarno dizajnirane za prikupljanje podataka, ne za djelovanje. Stoga, BSM ne ostvaruju željene performanse sa strane kašnjenja i

pouzdanosti. S druge strane, cilj BSAM jest ostvarivanje kvalitete usluge i malog kašnjenja te ostvarivanje ne samo osjetilne komponente nego i aktuacijske komponente. Stoga BSAM postaju vrlo lako primjenjive za područje automatizacije u kućama [73, 74]. Ovdje se najviše ističu primjene u sustavima kontrole pristupa, što obuhvaća dio istraživanja prije napravljen te objavljen u radovima [75, 76, 77, 78, 79]. U ovoj kategoriji očekivana maksimalna kašnjenja nalaze se u redu veličine do 1000 ms.

- **Industrijske primjene** - Područje industrijske primjene BSAM je relativno novo područje gdje je cilj uspostaviti vrlo visoku pouzdanost mreže, male vjerojatnosti odbacivanja paketa te male vrijednosti kašnjenja, kako bi se BSAM mogla primijeniti kao mreža za upravljanju unutar industrijskih postrojenja [80]. U ovom slučaju pojavljuje se mogućnost upravljanja robotima [70] te ostalim segmentima industrijskog upravljanja i kontrole, gdje je maksimalno kašnjenje najčešće definirano ispod 100 ms. U ovim scenarijima vrlo je važno ostvariti visoku pouzdanost mreže te otpornost na kvarove u slučaju da dio mreže postane nedostupan zbog kvara ili zagušenja radijskoga signala. Zbog velikog broja zahtjeva, primjena BSAM u industrijskim razmjerima još nije potpuna zaživjela, te je potrebno dodatno istraživanje i predlaganje novih protokola komunikacije koji mogu ostvariti tražene zahtjeve.

Iz pregleda primjena bežičnih senzorskih i aktorskih mreža može se zaključiti kako je njihova upotreba vrlo široka, ali postoje područja na kojima sama primjena još nije potpuno omogućena. Tu treba istaknuti industrijske primjene te primjene u sustavu kontrole pristupa. U ovim primjenama potrebno je ostvariti malo kašnjenje te visoku pouzdanost mreže, sa strane radijske komunikacije i otpornosti na kvarove.

3.4. Zaključak poglavlja

Bežične senzorske i aktorske mreže predstavljaju heterogenu mrežu senzora i aktora, gdje se princip komunikacije definira modelima koordinacije u BSAM. Postojeći modeli koordinacije u BSAM ne omogućuju primjene mreža za sve aplikacije. Pa tako, u slučaju prije navedenih aplikacija dolazi se do problema korištenja postojećih modela koordinacije kada je potrebno vršiti obradu podataka izvan polja BSAM. U slučaju centralizirane aktor-aktor koordinacije, aktor prima podatak od senzora i potrebno je isti poslati na obradu izvan polja BSAM, te podatak šalje akтору koji je zadužen za obradu. U slučaju kvara na akтору zaduženom za obradu podataka, podatak se neće moći obraditi uspješno. S druge strane, u distribuiranoj aktor-aktor koordinaciji više aktora se koristi za obradu podataka, no u ovom slučaju nastaje problem same obrade podataka te

kojem akтору je potrebno poslati koji podatak. Stoga se pokazuje potreba za prijedlogom modela koordinacije koji kombinira dobre strane centraliziranog i distribuiranog pristupa.

Sa strane podrške kvaliteti usluge u BSAM može se zaključiti kako podsloj pristupa mediju i mrežni sloj imaju najviše utjecaja na kvalitetu usluge. Prema pregledu postojećih protokola pristupu mediju može se zaključiti kako većina protokola podržava samo uslugu najbolje namjere (engl. *best effort*). Mali broj protokola jamči ograničenje na najveće kašnjenje koji su građeni na strukturi ćelija i zahtijevaju pristupne točke velikih snaga radi sinkronizacije mreže. Ovo predstavlja problem u velikim mrežama zbog nemogućnosti pokrivanja cijele površine BSAM s jednom pristupnom točkom velike snage. S druge strane, IEEE 802.15.4 predstavlja svestrano rješenje i standard komunikacije koji može udovoljiti komunikacijskim zahtjevima u BSAM. No, njegove prednosti dolaze uz cijenu umjerene energetske učinkovitosti, što predstavlja kompromis. Postavlja se pitanje analize postojećih MAC protokola u novim primjenama i novim modelima koordinacije, što je potrebno sustavno analizirati.

Prikazanim pregledom mrežnih protokola i algoritama usmjeravanja uočeno je kako većina protokola ne uzima u obzir MAC podsloj, te su protokoli usmjeravanja modelirani samo kao matematički modeli kroz teoriju grafova. Većina postojećih protokola su geografski protokoli koji uzimaju u obzir geografski položaj čvorova, koji u stvarnim primjenama nije poznat jer čvorovi najčešće nisu opremljeni s lokacijskim uređajem. Zbog malog broja protokola koji su predloženi za BSAM još uvijek se ne može sa sigurnošću definirati podrška kvaliteti usluge u BSAM. Uz nove aplikacije i potrebe za novim modelima koordinacije, potrebno je predložiti i nove protokole komunikacije koji mogu ostvariti bolje performanse mreže i poboljšavati kvalitetu usluge u BSAM. Novi protokoli trebaju biti orijentirani na međuslojni pristup (tj. biti osmišljeni poprečnim dizajnom slojeva), uzimati u obzir visoku pouzdanost komunikacije, malo kašnjenje, mobilnost i ponašanje mreže u scenarijima velikog zagušenja i opterećenja mreže, pogotovo u novim velikim mrežama koje mogu sadržavati više tisuća čvorova!

Stoga, u okviru ove disertacije u sljedećem poglavlju predložen je novi model koordinacije za BSAM koje su orijentirane na upit od strane čvorova, dok je u nadolazećim poglavljima predložen novi protokol komunikacije koji poboljšava kvalitetu usluge u BSAM i omogućuje veću pouzdanost mreže (manje kašnjenje) i u slučaju kvarova dijela mreže.

4. PRIJEDLOG HIBRIDNOG MODELA KOORDINACIJE U BEŽIČNIM SENZORSKIM I AKTORSKIM MREŽAMA

Pojavom paradigme *BigData* obrada podataka u velikim mrežama nastoji se preseliti sa centralizirane razine poslužitelja na razinu samog senzorskog polja. Kako jednostavni i računski ograničeni senzorski čvorovi ne posjeduju dovoljno resursa za naprednu obradu podataka, u određenim primjenama, podatke iz senzorskog polja je potrebno poslati na obradu izvan senzorskog polja prema lokalnoj mreži ili Internetu. U ovom konceptu dolazi se do pojma hibridne mreže gdje dolazi do spoja BSAM i Interneta u koncept Interneta objekata, IoT. Isto tako, zbog prijelaza između BSAM i klasičnih mreža, podrška QoS-u u ovim mrežama predstavlja dodatni izazov.

Navedene mreže mogu imati različitu funkcionalnost, različite topologije i različite modele koordinacije. Definiranje topologije i modela koordinacije ovisi primarno o aplikaciji tj. primjeni spomenute BSAM. Zbog činjenice da se BSAM naglo razvijaju, u vidokrug dolaze nove primjene BSAM-a gdje se postavlja pitanje da li postojeće arhitekture mreže mogu zadovoljiti nove aplikacije. Tu se ističu primjene i aplikacije u području industrijske automatizacije, gdje je potrebno osigurati visoku razinu pouzdanosti, uz malo kašnjenje i veliku zalihost mreže. Jedna od primjena za kojom se pojavljuje potreba u industrijskim okruženjima BSAM-a je komunikacija orijentirana na upit od strane aktorskog čvora. Spomenuta komunikacija temelji se na činjenici da aktorski čvorovi šalju upite (engl. *query*) prema centru za obradu podataka, očekujući odgovor na upit u što kraćem vremenu sa što većom pouzdanošću odgovora. Primjer ovih aplikacija može se pronaći u robotskim sustavima, gdje roboti šalju upite o određenom postupku prema centru obrade i zahtijevaju odgovor na postavljeni upit u što kraćem vremenu. Izravna primjena je u sustavima kontrole pristupa, gdje aktorski čvorovi šalju upite prema centru obrade o dopuštenju ostvarivanja pristupa nekom korisniku. Od ostalih aplikacija mogu se izdvojiti upravljanje robotima u taktičkim primjenama (npr. donošenje brzih odluka na bojištu, gdje se traži sugestija od udaljenih ljudskih operatera), praćenje pošiljki/prtljage u sustavima automatske distribucije poštanskih pošiljki i slične primjene.

Kod navedenih primjena pojavljuju se problemi nemogućnosti agregacije podataka, jer je svaki odaslati upit jedinstven te postoji mala vjerojatnost da će se isti upit ponoviti [81]. Isto tako, zbog dinamičnosti podataka, na isti upit se u kratkom vremenu mogu dobiti različiti odgovori, što u konačnici predstavlja i najveću prednost ove mrežne strukture.

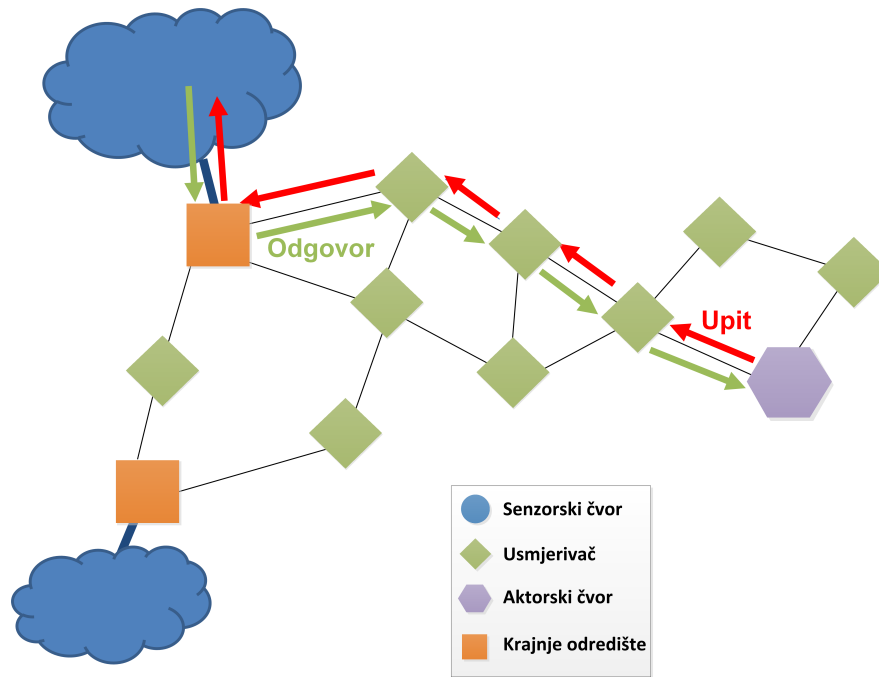
Kako bi se ostvarila funkcionalna BSAM potrebno je primijeniti model koordinacije na samu

mrežu. Postojeći modeli koordinacije odlikuju se s nekoliko nedostataka. Kod centralizirane aktor-aktor koordinacije, aktor prima podatak od senzora i isti prosljeđuje na obradu prema akтору zaduženom za obradu (centar obrade). U slučaju kvara na akтору zaduženom za obradu podataka, podatak se neće moći obraditi uspješno. U distribuiranoj aktor-aktor koordinaciji više aktora se koristi za obradu podataka, no u ovom slučaju nastaje problem same obrade podataka te kojem akтору je potrebno poslati koji podatak. Zbog navedenih nedostataka postojećih modela koordinacije, pojavljuje potreba za prijedlogom novog modela koordinacije. U tom slučaju naglasak bi trebao biti stavljen na kombinaciju dobrih strane centraliziranog pristupa, uz otpornost na kvarove distribuiranog pristupa.

Zbog navedenih nedostataka pokazuje se potreba za novim modelom koordinacije u BSAM, koji ostvaruje sve preduvjete za nove primjene i nove aplikacije. Primarno treba izdvojiti visoku pouzdanost komunikacije i obrade upita, malo kašnjenje u mreži te zalihost mreže (ukoliko dođe do kvara segmenta mreže). Stoga se u ovoj doktorskoj disertaciji predlaže novi model koordinacije u BSAM: **Hibridni model koordinacije u BSAM** temeljen na upitu od strane čvora u mreži.

Predloženi model koordinacije u mreži temelji se na spoju postojećih metoda koordinacije, gdje se integrira polu-automatski centralizirani model sa senzor-aktor koordinacijom i aktor-aktor koordinacijom. Dobivenom arhitekturom omogućuje se distribuirana obrada podatka na način da se podatci od aktora u mreži prosljeđuju prema centrima za odlučivanje, koji se nalaze izvan BSAM (u Internet ili LAN mreži). U ovom slučaju krajnja odredišta u mreži predstavljaju pristupnu točku pomoću koje se ostvaruje veza između BSAM i vanjske mreže. Zbog činjenice da ovaj pristup obuhvaća prije navedene modele koordinacije u BSAM te omogućuje povezanost mreža različitih tehnologija (BSAM i Internet/LAN mreže) isti je nazvan hibridni model koordinacije.

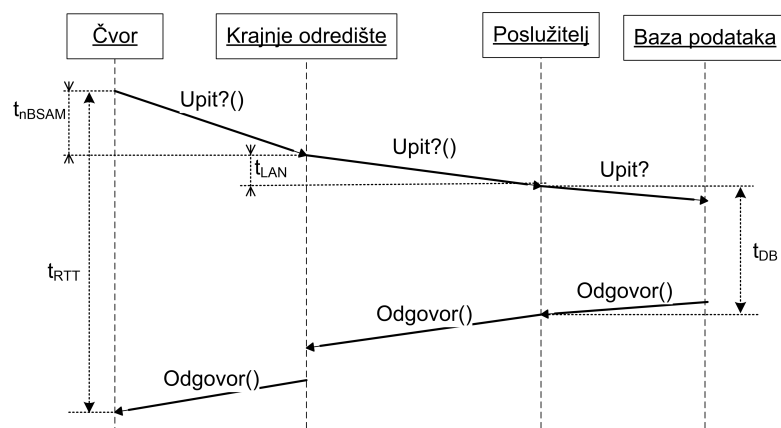
Metodologija komunikacije u hibridnom modelu koordinacije je sljedeća: upiti koji su formirani u mreži od strane aktora propagiraju se do krajnjeg odredišta u mreži te se prosljeđuju na obradu. Obrada se vrši izvan BSAM u centrima za obradu (kojih može biti više te se nalaze u LAN ili Internet mreži). Obradeni podatak šalje se natrag u BSAM prema krajnjem odredištu u mreži, koje dobiveni odgovor na upit prosljeđuje natrag aktorskom čvoru. U predloženom modelu koordinacije pojavljuje se integracija BSAM s postojećim mrežama kao npr. Ethernet LAN, Internet i *Cloud* uslugama. U ovoj arhitekturi iznimno je bitno ostvariti učinkoviti prijelaz između BSAM i ostalih mreža gdje je potrebno osigurati učinkovitu komunikaciju između mreža s podrškom QoS-u, što predstavlja otvoreni problem područja istraživanja [34, 82]. Promatrajući arhitekturu predloženog modela koordinacije (slika 4.1) uviđaju se razni problemi područja koji će



Slika 4.1. Hibridni model koordinacije u BSAM

biti razmotreni u nastavku.

Sa strane primjene predloženog hibridnog modela koordinacije treba izdvojiti primjenu u sustavima bežične kontrole pristupa, kao analizu slučaja (engl. *case study*) korištenu u ovoj disertaciji. U ovom specifičnom slučaju, čvorovi BSAM imaju zadaću izvršiti postupak autorizacije i autentifikacije korisnika koji pristupaju pristupnoj točki (vratima) te u ovisnosti o uspješnosti postupka autorizacije dopustiti ili spriječiti ulaz u određeni prostor. Kako bi se omogućio ovaj postupak, zadaća senzorskog/aktorskog čvora jest detektirati jedinstveni identifikacijski broj osobe (putem RFID, magnetske kartice i sl.) te dobiveni podatak proslijediti prema bazi podataka u obliku upita. Nakon što je upit obrađen u bazi podataka, odgovor je potrebno proslijediti čvoru koji je poslao upit kako bi se mogla donijeti odluka o postupku autentifikacije/autorizacije korisnika.

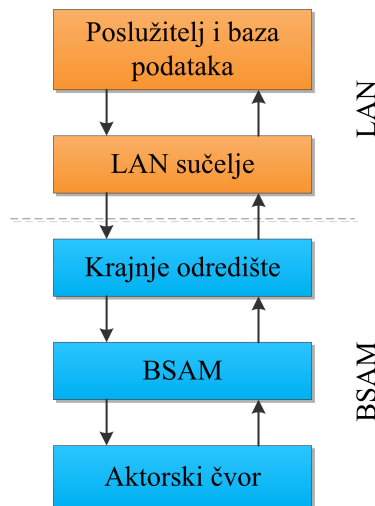


Slika 4.2. Prikaz vremena odziva kod modela upita od strane senzorskog čvora u BSAM

Jednostavan primjer ovakvog modela prikazan je na slici 4.2 gdje je vidljiv princip komunikacije u ovom modelu te način propagacije upita kroz mrežu. Aktorski čvor formira upit te isti prosljeđuje prema krajnjem odredištu mreže. Kad se upit uspješno dostavi krajnjem odredištu u mreži, isti se prosljeđuje putem LAN mreže prema poslužitelju i bazi podataka na poslužitelju. Završetkom obrade unutar baze podataka, odgovor na upit prosljeđuje se natrag krajnjem odredištu pri čemu krajnje odredište mreže ima zadatak da odgovor na upit proslijedi onom aktorskom čvoru koji je uputio upit. Nakon što aktorski čvor uspješno primi odgovor na upit zatvoren je krug prijenosa podataka kroz mrežu. Na temelju razlike vremena od slanja upita do primanja odgovora moguće je odrediti vrijeme odziva (engl. *Round Trip Time*, RTT) te u konačnici vjerojatnost uspješnog upita (kao omjer sume broj odaslanih upita i sume broja primljenih odgovora):

$$t_{RTT} = 2 \cdot t_{nBSAM} + 2 \cdot t_{LAN} + t_{DB} \quad (4-1)$$

gdje je t_{nBSAM} kašnjenje (latencija) u BSAM (za n skokova), t_{LAN} je vrijeme komunikacije potrebno za slanje paketa kroz LAN sučelje te t_{DB} predstavlja vrijeme obrade baze podataka. U ovom slučaju, komunikacija u BSAM je predstavljena kao simetrična komunikacija. Parametri kašnjenja i vjerojatnosti uspješnog slanja paketa ovise samo o BSAM i protokolu komunikacije.



Slika 4.3. Blok dijagram komunikacije u hibridnom modelu koordinacije

Kako bi se definirala vjerojatnost uspješnog upita (vjerojatnost da na poslani upit aktor dobije odgovor) potrebno je sagledati blok dijagram komunikacije (slika 4.3). Naime, u predloženoj hibridnoj mreži postoji nekoliko komponenata koje izravno utječu na vjerojatnost uspješnog upita. One se sastoje od vjerojatnosti uspješne obrade podataka na poslužitelju, vjerojatnosti uspješnog prijenosa podataka kroz LAN mrežu, vjerojatnost uspješne obrade podataka i enkapsulacije na

strani koordinatora mreže te vjerojatnosti uspješnog prijenosa podataka u BSM. Na sve vjerojatnosti (osim u BSAM-a) izravno utječe gomilanje u redu (međuspremniku) pri čemu njihova vjerojatnost ovisi o vjerojatnosti odbacivanja paketa iz repa podataka. Analizirajući tijek komunikacije od strane baze podataka i poslužitelja, za obje komponente moguće je definirati vjerojatnost uspješne obrade podataka. Kada se govori o bazi podataka i poslužitelju, njihova pouzdanost (vjerojatnost uspješne obrade podataka) mora biti iznimno velika i u predloženoj hibridnoj mreži nju možemo pretpostaviti s vjerojatnošću 1. Isto se može pretpostaviti i za vjerojatnost LAN komunikacije, primarno zbog činjenice da je maksimalni kapacitet kanala Ethernet LAN mreže na fizičkom sloju 10 Mbit/s, dok je maksimalni kapacitet kanala BSAM koordinatorskog čvora na fizičkom sloju 250kbit/s. Isto vrijedi i za bazu podataka. S obzirom da suvremene baze podataka podržavaju više tisuća upita u sekundi (npr. *MySQL*) maksimalni broj upita jednog krajnjeg odredišta iznosi svega 160 upita/s (proračun napravljen za $C = 250kbit/s$, veličina BSM paketa $I = 1600bit$ MAC+PHY okvir za jedan upit). Iz navedenog, moguće je definirati model uspješnog upita u BSAM kao:

$$P_e = P_{BSAM_U} \cdot P_{COORD_U} \cdot P_{COORD_D} \cdot P_{BSAM_D} \quad (4-2)$$

gdje P_{BSAM_U} definira vjerojatnost uspješnog slanja upita od aktorskog čvora do krajnjeg odredišta u mreži, P_{BSAM_D} vjerojatnost uspješnog slanja odgovora na upit od krajnjeg odredišta u mreži do aktorskog čvora, a P_{COORD_U} i P_{COORD_D} vjerojatnost uspješne obrade uzlaznog/silaznog (upita/odgovora) tijekom podataka na krajnjem odredištu (ovisi o vjerojatnosti odbacivanja paketa iz repa zbog gomilanja i zagušenja).

Zbog nedovoljne istraženosti hibridnog modela koordinacije ova vrsta BSAM-a izrazito je zanimljiva s aspekta ponašanja same mreže u uvjetima kada je potrebno ostvariti određenu kvalitetu usluge. Također, iznimno je važno analizirati vjerodostojnost simulacije i eksperimenta. Sukladno tome, naglasak istraživanja ove disertacije postavljen je na podržavanje kvalitete usluge u bežičnim senzorskim i aktorskim mrežama (BSAM) u kritičnim uvjetima zagušenja, kad svi čvorovi u mreži simultano šalju upite i očekuju odgovor u minimalnom vremenu s maksimalnom pouzdanošću.

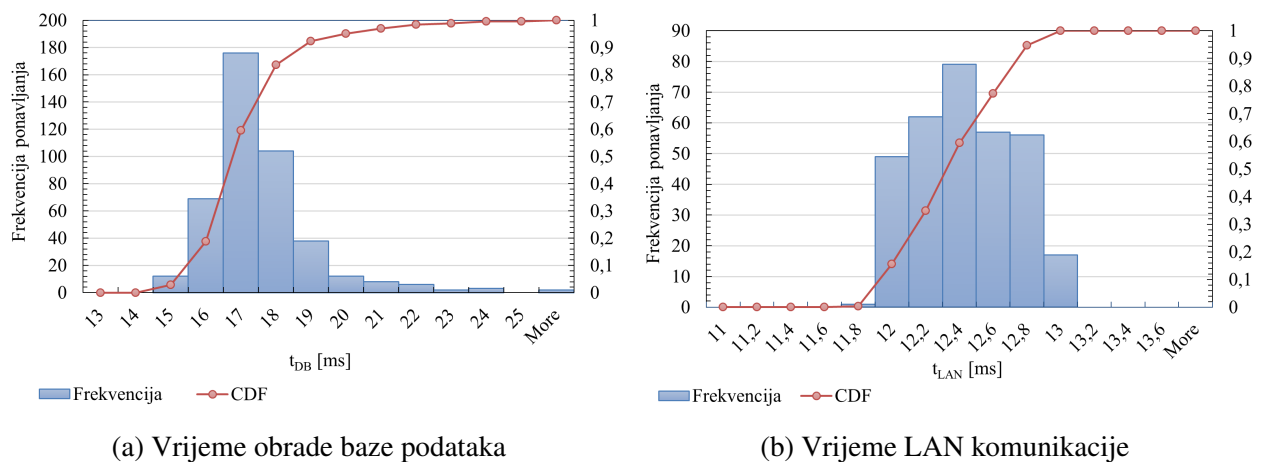
U hibridnom modelu koordinacije krajnji cilj je pružanje kvalitete usluge, uz što manje vrijeme odziva i veliku vjerojatnost uspješnog upita. Kako bi se omogućila kvantitativna ocjena kvalitete usluge potrebno je definirati metrike koje će se koristiti prema hibridnom modelu koordinacije. Tako se predlažu metrike: vrijeme odziva (engl. *round-trip-time*) i vjerojatnost uspješnog upita (engl. *round-trip-reliability*), opisano dalje u tekstu.

4.1. Opis ispitnog okruženja

Kako bi se prikazala primjena predloženog hibridnog modela koordinacije predložena je analiza slučaja (engl. *case study*) za primjenu u bežičnom sustavu kontrole pristupa. Ova analiza slučaja opisana je u članku [77] gdje je detaljno opisan ovaj slučaj primjene hibridnog modela koordinacije.

U primjeni hibridnog modela koordinacije u sustavu kontrole pristupa predložena je arhitektura sustava analogna predloženom modelu koordinacije, gdje se na strani krajnjeg odredišta u mreži vrši obrada podataka (u bazi podataka). Princip rada sustava je sljedeći: korisnik želi pristupiti određenoj prostoriji pri čemu svoju karticu prislanja beskontaktnom RFID čitaču. Čitač očitava broj kartice te šalje upit prema krajnjem odredištu u mreži radi obrade upita. Nakon što se upit propagira kroz mrežu do krajnjeg odredišta, šalje se putem lokalne mreže (prvo putem RS232 komunikacije, nakon toga LAN) bazi podataka koja vrši obradu upita (da li korisnik smije pristupiti prostoriji) te šalje odgovor na upit prema čvoru koji je inicirao upit. Nakon što čvor primi odgovor na upit aktivira se aktorski dio čvora, koji otvara pristup korisniku (putem aktuatora).

Kako bi se ova komunikacija mogla modelirati i u simulacijskom okruženju potrebno je odrediti vremena obrade baze podataka i vremena propagacije signala kroz RS232 kanal i LAN mrežu. S tim ciljem napravljeno je statističko modeliranje ovih veličina. Modeliranje je izvršeno tijekom normalnog rada sustava, gdje su vremena obrade baze podataka i vremena LAN komunikacije zapisivana i analizirana. Analiza je izvršena za 432 upita (paketa) poslana na obradu u bazu podataka te 321 paket LAN komunikacije. Analizom su dobiveni histogrami kašnjenja, prikazani na slici 4.4.



Slika 4.4. Histogrami vremena hibridnog modela koordinacije (eksperiment)

Iz dobivenih histograma moguće je odrediti statističke značajke ovog signala, primjenjujući normalnu Gaussovu razdiobu. Tako modelirani parametri navedeni su u dolje prikazanim tablicama 4.1 i 4.2.

Tablica 4.1. Parametri statističke analize vremena obrade baze podataka

Parametar	Vrijednost
Srednja vrijednost [ms]	17,5625
Median [ms]	17
Standardna devijacija [ms]	1,6365
Minimum [ms]	15
Maksimum [ms]	30
Broj uzoraka	432

Tablica 4.2. Parametri statističke analize vremena LAN komunikacije

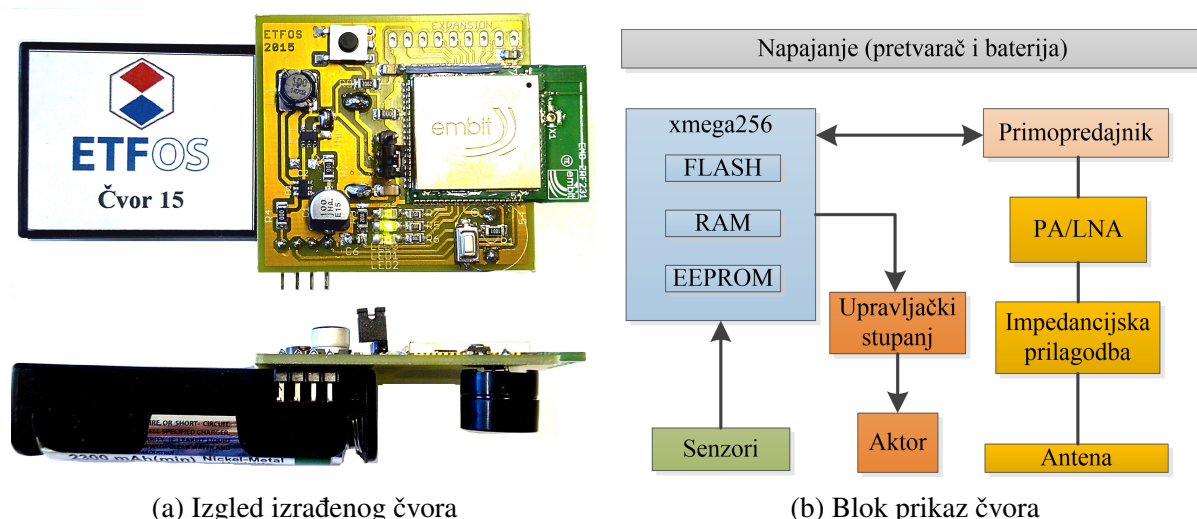
Parametar	Vrijednost
Srednja vrijednost [ms]	12,3406
Median [ms]	12,336
Standardna devijacija [ms]	0,28465
Minimum [ms]	11,69
Maksimum [ms]	12,916
Broj uzoraka	321

Podatci prikazani u tablici 4.1 prikazuju parametre normalne razdiobe za vrijeme obrade baze podataka. Ova veličina varira između 15 ms i 30 ms, no većina uzoraka ($\pm 2\sigma$ za $Pr = 0,9545$) nalazi se oko srednje vrijednosti od 17,56 ms $\pm 3,27$ ms. Stoga se može zaključiti kako vrijeme obrade baze podataka nije konstantno, nego varira oko srednje vrijednosti, stoga je taj parametar potrebno uzeti kao slučajnu varijablu normalne razdiobe sa srednjom vrijednošću od 17,56 ms i standardnom devijacijom od 1,636 ms. Treba napomenuti da nije uočena značajna korelacija između vremena obrade baze podataka i količine prometa.

Na isti način analiziran je parametar vremena LAN komunikacije (tablica 4.2). Kako je navedeno i prije, u ovaj parametar uključeno je vrijeme slanja podatka putem LAN veze i vrijeme slanja podatka putem RS232 veze, čija je brzina prijenosa podataka ograničena na 115200 Baud-a. Zbog uskog grla pojavljuje se kašnjenje komunikacije koje ima srednju vrijednost 12,34 ms. Ono što treba uočiti je vrlo mala vrijednost standardne devijacije, što znači da se glavnina kašnjenja odvija oko srednje vrijednosti od 12,34 ms $\pm 0,5$ ms. Zbog spomenutoga ova vrijednost se može modelirati i kao fiksna vrijednost kašnjenja od 12,34 ms, zbog vrlo malog rasipanja vrijednosti.

U postupku simulacije BSAM ove veličine potrebno je poznavati *a priori* kako bi se omogućila cjelovita simulacija bežične senzorske i aktorske mreže u hibridnom modelu koordinacije. Dobiiveni parametri iz gore navedenih tablica koristit će se kao model kašnjenja u postupku simulacije, na način da se kašnjenje definira slučajnom varijablom normalne razdiobe.

Kako bi se omogućilo eksperimentalno vrednovanje osmišljen je dizajn bežičnog senzorskog i aktorskog čvora, na temelju bežičnog modula RF231 [83]. Isti je prikazan na slici 4.5.



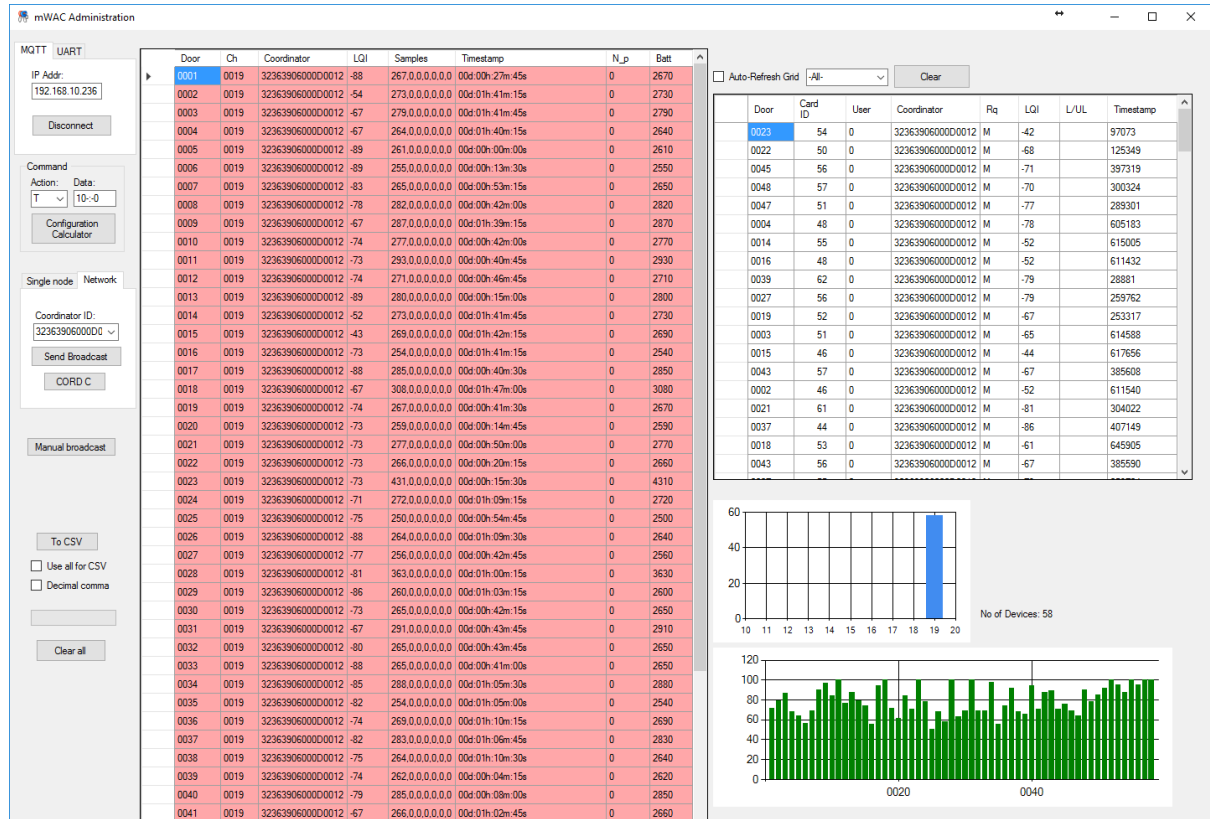
Slika 4.5. Bežični senzorski (i aktorski) čvor

Čvor se sastoji od baterijskog napajanja, mikro-upravljača ATxmega256A3U (koji realizira protokol komunikacije), radijskog primopredajnika AT86RF231 (koji implementira fizički sloj i podsloj pristupa mediju CSMA/CA) i pretpojačala/pojačala snage koji ostvaruju veću osjetljivost radijskog prijemnika i jaču izlaznu snagu odašiljanja. Na modulu se nalazi integrirana PIFA (engl. *Planar Inverted-F Antenna*) sa pojačanjem od 2 dBi.

Arhitektura krajnjeg odredišta u mreži je identična, osim dodatnog komunikacijskog modula prema *Ethernet* LAN lokalnoj mreži. LAN modul povezan je preko UART protokola komunikacije i RS232 standarda sa čvorom/krajnjim odredištem u mreži (engl. *sink*).

Kako bi se omogućilo povezivanje i nadzor nad svim čvorovima u mreži razvijena je aplikacija u C# programskom jeziku koja je preko poslužiteljske okosnice povezana sa svim krajnjim odredištima u mreži, čime se omogućuje administracija svih čvorova u mreži. Izgled aplikacije razvijene s povezanih 30 čvorova prikazan je na slici 4.6.

Razvijena računalna aplikacija omogućuje nadzor nad radom bežičnih senzorskih i aktorskih čvorova i pregled parametara kao što je razina baterije, razina RF prijemnog signala, te upravljanje čvorovima slanjem naredbi. Ovim se omogućuje ispitivanje komunikacije u mreži na način da se udaljeno pokrenu prije definirani testovi. Naposljetku, aplikacija omogućuje statističku obradu svih podataka odošlih od strane čvorova u mreži, prema predloženim metrikama kvalitete usluge u hibridnom modelu koordinacije.



Slika 4.6. Izgled računalne aplikacije razvijene za administraciju BSAM mreže

4.2. Metrike QoS u BSAM i hibridnom modelu koordinacije

U mreži koja se sastoji od N čvorova, gdje svaki čvor šalje K upita prema bazi podataka, moguće je definirati kolektivnu metriku parametara vremena odziva i vjerojatnosti uspješnog upita, na način da se kumulativno obuhvate svi upiti u mreži. Tako definirane kolektivne metrike mreže će u daljnjem tekstu biti referencirane samo kao metrike. Definirane metrike QoS su predložene na temelju postojećih metrika u literaturi [2, 11, 13, 16, 84, 85] te obuhvaćaju specifičnosti hibridnog modela koordinacije u BSAM. Definirane metrike su:

- **Vjerojatnost uspješnog upita** - definira vjerojatnost da se upit uspješno propagira kroz BSAM do baze podataka te da se odgovor na upit uspješno propagira kroz BSAM natrag do aktorskog čvora, na sve upite odaslane od svih čvorova u mreži. Ova metrika se matematički može definirati kao:

$$p_e = \frac{1}{N \cdot K} \cdot \sum_{i=1}^N K_{i_{uspjesn}} \quad (4-3)$$

gdje je $K_{i_{uspjesn}}$ broj uspješno primljenih odgovora na ukupno K upita koje svaki i -ti čvor šalje prema bazi podataka, a N je broj čvorova u mreži.

- **Srednja vrijednost vremena odziva** - definirano je kao srednja vrijednost sume vremena uzlazne veze (vrijeme propagacije upita), vremena obrade baze podataka i vremena silazne veze (vrijeme propagacije odgovora), za sve upite u mreži. Definira se kolektivno na razini cijele mreže kao srednja vrijednost:

$$t_{RTT} = \frac{1}{N \cdot K} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K t_{RTT_{ij}} \quad (4-4)$$

gdje je $t_{RTT_{ij}}$ vrijeme odziva za jedan upit j , od ukupno K upita odaslanih sa i -tog čvora, u mreži koja se sastoji od ukupno N čvorova. U tom slučaju t_{RTT} predstavlja srednju vrijednost vremena odziva u mreži.

- **Maksimalno vrijeme odziva** - definira maksimalno vrijeme odziva u promatranom vremenskom prozoru na ukupno K upita koje svaki i -ti čvor šalje prema bazi. Maksimalno vrijeme odziva u mreži definira se kao:

$$t_{RTT_{MAX}} = \max(t_{RTT_{ij}}) \quad (4-5)$$

Osim metrika kvalitete usluge u predloženom hibridnom modelu koordinacije bitno je definirati još jednu veličinu koja govori u opterećenju cjelokupne mreže. Budući da se u hibridnom modelu koordinacije koristi model upita od strane aktorskih čvorova, za opterećenje mreže nisu primjenjive klasične metrike zagušenja mreže kao što je propusnost mreže (engl. *throughput*) nego je potrebno definirati pokazatelj koji govori o broju upita koje jedna mreža generira.

U tu svrhu uvodi se mjera ukupnog broja upita cijele mreže, u jedinici vremena - CQPS (engl. *Cumulative Queries Per Second*) koja se definira kao:

$$CQPS = \frac{1}{t} \cdot \sum_{i=1}^N K_i \quad (4-6)$$

gdje je K_i broj odaslanih upita od strane čvora i u vremenu t . S obzirom da jednadžba predlaže sumu broja svih upita odaslanih od svih čvorova, ova mjera pokazuje mjeru generiranog prometa cijele mreže. Zbog činjenice da se u predloženom hibridnom modelu koordinacije šalje nepoznat broj upita, a srednja vrijednost svih vremena između upita je poznata, mjera CQPS se može definirati:

$$CQPS = \frac{N}{t_{avg}} \quad (4-7)$$

gdje je N broj čvorova u mreži koji šalju upite (aktivnih čvorova), a t_{avg} je prosječno vrijeme između slanja uzastopnih upita. Ukoliko se upiti šalju s vremenom između uzastopnih upita koje je definirano uniformnom razdiobom ($U[0, T_{max}]$, gdje je $t_{avg} = \frac{T_{max}}{2}$), tada se vrijednost CQPS mjere može izraziti kao:

$$CQPS = \frac{2 \cdot N}{T_{max}} \quad (4-8)$$

Zbog činjenice da CQPS obuhvaća cijelu mrežu, ovom mjerom moguće je objediniti dva parametra, broj čvorova u mreži N i vrijeme između upita t u jedan parametar mreže. Tada se po dizajnu mreže mogu definirati maksimalni uvjeti koje mreža može ostvariti. Ovo je pretpostavka koja će biti istražena u sljedećim potpoglavljima.

4.3. Ispitivanje kvalitete usluge postojećih protokola

Specifičnost predloženog hibridnog modela koordinacije uviđa se u potrebi za slanjem upita i primanjem odgovora na upit, u što kraćem vremenu sa što većom pouzdanošću. Ovaj princip komunikacije stvara dodatno opterećenje mreže jer je u vrlo kratkom vremenu potrebno poslati i odgovor i upit u mreži, koristeći dijeljeni medij (RF). Zbog ovog principa komunikacije postavlja se pitanje kako se postojeći protokoli komunikacije mogu nositi s ovim dodatnim opterećenjem u mreži?

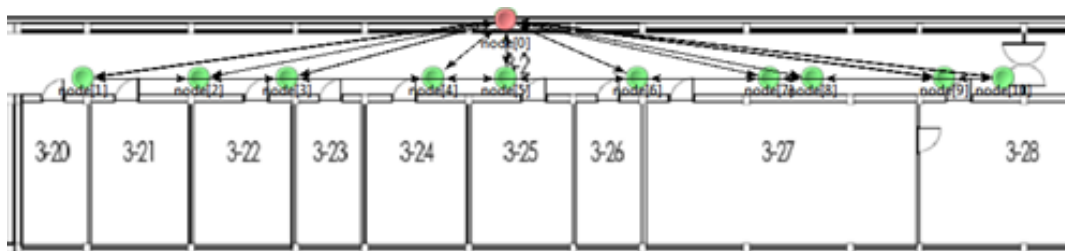
Zbog navedenog napravljeno je ispitivanje komunikacije u predloženom hibridnom modelu koordinacije pomoću postojećih protokola komunikacije. Preliminarni rezultati istraživanja hibridnog modela koordinacije u BSAM provedeni su na nekoliko postojećih standarda (protokola) koji su najzastupljeniji u bežičnim senzorskim mrežama. Razlog odabira protokola BSM-a umjesto BSAM-a jest činjenica da zbog nedovoljne istraženosti BSAM-a ne postoje definirani standardi komunikacije niti cjeloviti protokoli koji bi se mogli usporediti. Kako su BSAM nasljednici BSM, metodologija istraživanja iziskuje potrebu za sustavnom analizom postojećih standarda (protokola) BSM-a zbog mogućnosti primjene istih u BSAM.

Analizirani protokoli uključuju: Atmel *LightWeight Mesh* protokol, IEEE 802.15.4 protokol komunikacije u načinu rada sa i bez sinkronizacijskog impulsa. Na spomenutim protokolima ispitana je komunikacija u hibridnom modelu koordinacije kroz eksperiment u laboratorijskim uvjetima. Analiziran je kritični slučaj komunikacije kada u mreži s N čvorova, svi čvorovi simultano šalju upite prema koordinatoru mreže, te očekuju odgovor (nakon obrade u centru za obradu) u naj-

kraćem mogućem vremenu. Upiti se šalju svakih t sekundi, gdje je t slučajna varijabla uniformne razdiobe definirana kao $U[0, T]$. U rezultatima preliminarnih istraživanja pokazani su rezultati za IEEE 802.15.4 u načinu rada s i bez sinkronizacijskog impulsa (*beacon* i *non-beacon*) te LWM protokol komunikacije.

Prema predloženom modelu i razvijenom sklopu senzorskog čvora (slika 4.5) pristupilo se eksperimentalnom vrednovanju predložene jednostavne topologije zvijezde u hibridnom modelu koordinacije. Kako bi se omogućio stvarni scenarij eksperimenta isti je proveden na postojećoj bežičnoj mreži korištenoj u sustavu kontrole pristupa, na temelju čega su prethodno modelirani sekundarni parametri vremena odziva za simulaciju.

U BSAM i hibridnom modelu koordinacije iznimno je važno uspostaviti uspješnu komunikaciju s kraja na kraj (engl. *end-to-end*) dva puta uzastopno (upit-odgovor), što dodatno povećava opterećenje mreže i degradira kvalitetu usluge u mreži. Zbog očekivane degradacije QoS u velikim BSAM iznimno je važno ispitati i modelirati ponašanje BSAM i hibridnog modela koordinacije u jednostavnim topologijama i jednostavnim scenarijima, kako bi se omogućila podrška QoS i u velikim BSAM. Radi toga, prvi korak obuhvaća sustavnu analizu BSAM u jednostavnoj topologiji zvijezde, implementirajući hibridni model koordinacije i okruženje za eksperimentalno ispitivanje. Prema predloženom okruženju za eksperimentalno ispitivanje i primjenu u sustavu kontrole pristupa definiran je izgled topologije jednog kata zgrade (slika 4.7). Topologija se sastoji od n čvorova i jednog krajnjeg odredišta mreže.

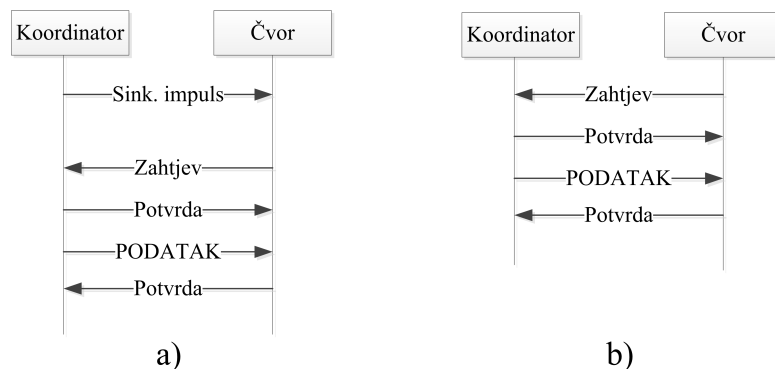


Slika 4.7. Topološki prikaz postavljanja čvorova BSAM-a u predloženom okruženju

4.3.1. IEEE 802.15.4 u načinu rada bez sinkronizacijskog impulsa

Jedan od najzastupljenijih standarda u području BSM-a je IEEE 802.15.4 standard koji definira fizički sloj i podsloj pristupu mediju, kao temelj ostalih protokola (npr. *ZigBee* protokola). U spomenutom standardu postoje dvije inačice: rad sa sinkronizacijskim impulsom (engl. *beacon enabled*) i rad bez sinkronizacijskog impulsa (engl. *non-beacon enabled*). Način rada sa sinkronizacijskim impulsom (engl. *beacon enabled*) koristi CSMA/CA s vremenskim odsječcima (engl.

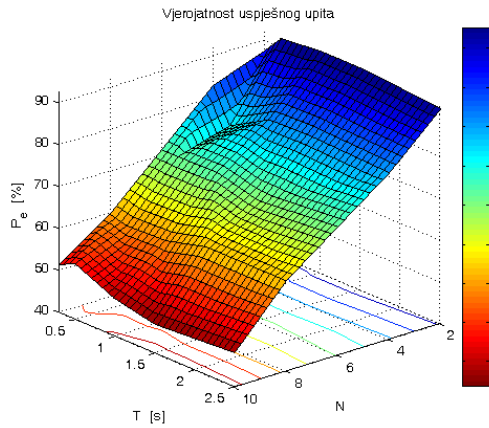
slotted CSMA/CA) dok rad bez sinkronizacijskog impulsa (engl. *non-beacon enabled*) koristi klasični CSMA/CA. Način rada bez sinkronizacijskog impulsa ne šalje periodičke *beacon* impulse nego se čvorovi javljaju koordinatoru na *ad-hoc* način. No iako je slanje podataka od čvora prema koordinatoru olakšano, dohvaćanje podataka od koordinatora prema senzorskom čvoru je otežano zbog činjenice da senzorski čvor mora prozivati koordinator i od istoga potraživati željeni podatak (engl. *polling*) [86]. Ovo predstavlja problem za kritični scenarij kad svi čvorovi potražuju podatke od koordinatora jer se stvara nepotreban promet i zagušenje komunikacijskog kanala, što je prikazano na slici 4.8.



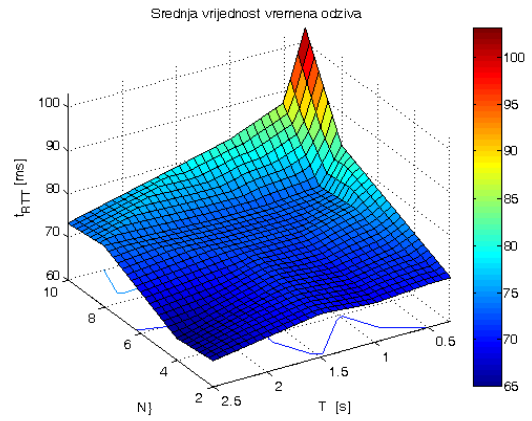
Slika 4.8. IEEE 802.15.4 MAC protokol u načinu rada sa sinkronizacijskim impulsom (a) i bez sinkronizacijskog impulsa (b) - vremenski slijed komunikacije

U ovom slučaju primarni problem predstavlja podsloj pristupa mediju (MAC) koji nije prilagođen za hibridni model koordinacije upita od strane senzorskih čvorova, gdje se osim slanja upita očekuje i odgovor nakon udaljene obrade podataka. Kako bi se isti demonstrirao provedena su mjerenja na hibridnom modelu koordinacije u mreži s N čvorova gdje svaki čvor šalje K upita prema bazi svakih t sekundi (definirano uniformnom razdiobom). Kako bi se analiziralo ponašanje postojećeg protokola komunikacije izvršen je eksperiment u laboratorijskim uvjetima gdje je promatran broj čvorova i vrijeme između slanja uzastopnih upita u odnosu na vjerojatnost uspješnog upita i vrijeme odziva. Rezultati istraživanja za IEEE 802.15.4 u načinu rada bez sinkronizacijskog impulsa prikazani su na slici 4.9.

Kao što je vidljivo iz površinskog dijagrama načina rada bez sinkronizacijskog impulsa, vjerojatnost uspješnog upita u mreži ovisi izravno o broju čvorova u mreži, dok intenzitet generiranja upita ima manji utjecaj (slika 4.9a). Primarni razlog ovom ponašanju jest činjenica da u spomenutom načinu rada svi čvorovi moraju konstantno prozivati koordinator kako bi mogli primiti odgovor na poslani upit. Ovaj postupak nepotrebno stvara zagušenje na koordinatoru mreže čak i u slučaju kada je intenzitet generiranja upita minimalan. Ukoliko se prikaže ovisnost broja čvorova o vje-



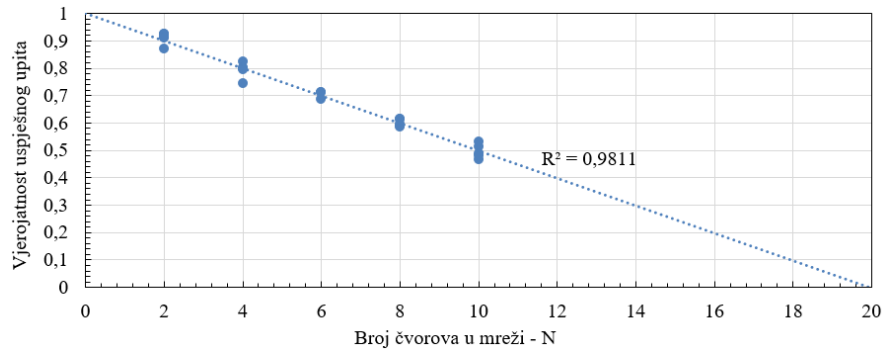
(a) Vjerojatnost uspješnog upita



(b) Srednja vrijednost vremena odziva

Slika 4.9. Eksperimentalno vrednovanje hibridnog modela koordinacije za IEEE 802.15.4 u načinu rada bez sinkronizacijskog impulsa

rojatnosti uspješnog upita na dijagramu (slika 4.10) može se zaključiti da postoji proporcionalna ovisnost između vjerojatnosti uspješnog upita o broja čvorova u mreži, što rezultira da u kritičnim uvjetima spomenuta vjerojatnost dolazi do 0 (za $N = 20$).



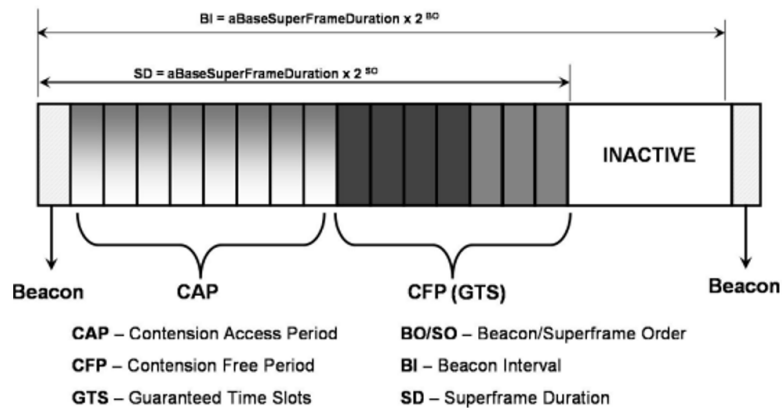
Slika 4.10. Vjerojatnost uspješnog upita za IEEE 802.15.4 u načinu rada bez sinkronizacijskog impulsa u hibridnom modelu koordinacije

Zbog ove činjenice izravno je pokazano kako predloženi protokol komunikacije nije primjenjiv za područje bežičnih senzorskih i aktorskih mreža, u hibridnom modelu koordinacije.

4.3.2. IEEE 802.15.4 u načinu rada sa sinkronizacijskim impulsom

Način rada sa sinkronizacijskim impulsom šalje periodičke impulse (engl. *beacons*) nakon čega se pomoću TDMA (engl. *Time Division Multiple Access*) pristupa definiraju vremenski odsječci u kojima se čvorovi javljaju i šalju podatke prema koordinatoru (i obratno). On koristi CSMA/CA pristup mediju s vremenskim odsječcima, pri čemu se definiraju vremenski intervali u kojima senzorski čvorovi šalju/primaju podatke. Princip komunikacije prikazan je na slici 4.11. Vrijeme

između slanja sinkronizacijskog impulsa (engl. *beacon*) podijeljeno je u vremenske odsječke, te se ukupno vrijeme naziva BI (*Beacon Interval*). Ovaj interval ovisi o puno parametara te u suštini definira minimalno kašnjenje - QoS. Ukoliko se BI poveća, povećati će se i kašnjenje u mreži što će pogoršati QoS u mreži.

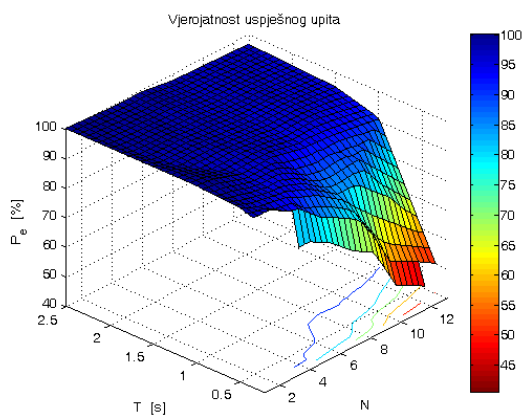


Slika 4.11. IEEE 802.15.4 protokol u načinu rada sa sinkronizacijskim impulsom - vremenski okvir komunikacije [87].

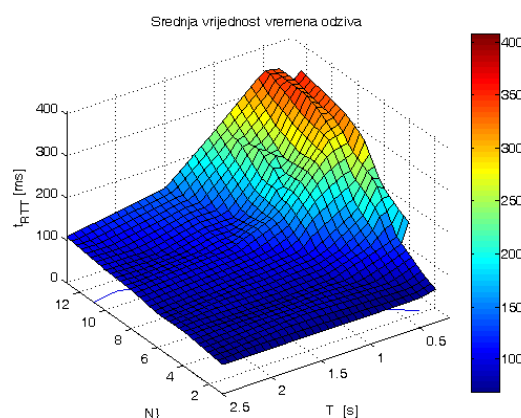
U idealnom slučaju BI treba biti što manji, tj. jednak trajanju super okvira SD, no to nije uvijek moguće ostvariti. U velikim mrežama sa višestrukim skokovima ovaj interval potrebno je povećati kako bi se omogućilo ispravno strukturiranje mreže, što povećava latenciju na vrijednost od nekoliko sekundi u mrežama s 10-ak skokova. Ovo predstavlja inicijalni problem komunikacije za način rada sa sinkronizacijskim impulsima.

U okviru ovog istraživanja izvršena je analiza komunikacije predloženog hibridnog modela koordinacije za način rada sa sinkronizacijskim impulsom, te su rezultati istraživanja prikazani na slici 4.12.

U slučaju načina rada sa sinkronizacijskim impulsom mreža nije toliko osjetljiva na povećanje broja čvorova u mreži, što predstavlja izravnu prednost u odnosu na načina rada bez sinkronizacijskog impulsa. U slučaju malog intenziteta generiranja upita (niska razina prometa) ova mreža ostvaruje visoku pouzdanost čak i za veći broj čvorova, no ostvaruje povećano vrijeme odziva u odnosu na način rada bez sinkronizacijskog impulsa. U slučaju velikog broja čvorova u mreži i velikom intenzitetu generiranja upita u vrlo kratkom periodu nastat će zagušenje te će doći do odbacivanja paketa zbog nemogućnosti pristupa mediju. Iako ovaj način rada pokazuje prednosti prema načinu rada bez sinkronizacijskog impulsa, u velikim mrežama zbog potrebe za povećanjem BI vrijednosti vremena odziva drastično će se povećavati, što se rezultirati niskom QoS [36, 88]. Ovo izravno onemogućuje primjenu IEEE 802.15.4 načina rada sa sinkronizacijskim impulsom u velikim BSAM.



(a) Vjerojatnost uspješnog upita



(b) Srednja vrijednost vremena odziva

Slika 4.12. Eksperimentalno vrednovanje hibridnog modela koordinacije za IEEE 802.15.4 MAC protokol u načinu rada sa sinkronizacijskim impulsom

4.3.3. Atmel LightWeight Mesh - LWM

Protokol *LightWeight Mesh* (LWM) tvrtke Atmel predstavlja jednostavni protokol otvorenog stoga (engl. *open source*) koji koristi neke komponente standarda IEEE 802.15.4 kako bi ostvario učinkovitu komunikaciju [89]. Zbog činjenice da ne sadrži metode pozivanja čvorova ili TDMA strukturu, ovaj protokol ima dobru perspektivu za uporabu u hibridnom modelu koordinacije.

Protokolni stog spomenutog protokola sastoji se od fizičkog sloja, podsloja pristupa mediju i mrežnog sloja. Iznad osnovnog LWM stoga postavlja se aplikacijski sloj (sa željenom aplikacijom). Fizički sloj i podsloj pristupa mediju definirani na temelju IEEE 802.15.4 standarda [57] te se u svojoj suštini sastoje od sljedećih komponenti: Na strani fizičkog sloja nalazi se radijski primopredajnik koji radi u frekvencijskom opsegu od 2,4 GHz sa mogućnošću rada na 10 različitih kanala. Nadalje, kapacitet komunikacijskog kanala definiran je modulacijom i iznosi maksimalno 250 kbit/s. Za pristup mediju koristi se CSMA/CA bez vremenskih odsječaka (engl. *unslotted*), što ima zajedničko s IEEE 802.15.4 protokolom bez sinkronizacijskog impulsa. Sličnosti ovih protokola ovdje prestaju te na višim slojevima LWM protokol definira mrežni sloj te protokol usmjeravanja.

Na mrežnom sloju LWM protokola definirane su sljedeće značajke protokola:

1. **Ulazno/izlazni red** (engl. *queue*) **za slanje i primanje paketa** - svi paketi koji prolaze kroz mrežni sloj stavljaju se u ulazno/izlazni red. Veličina reda ograničena je s memorijskim prostorom te u ovoj implementaciji iznosi 50 paketa.
2. **Protokol usmjeravanja** - protokol usmjeravanja temeljen je na AODV (engl. *Ad hoc On-Demand Distance Vector*) protokolu u pojednostavljenoj izvedbi. Protokol je iz porodice

reaktivnih protokola koji otkriva put kroz mrežu na zahtjev, te se podatci o krajnjim odredištima čuvaju u tablici usmjeravanja na svakom čvoru. Izgled tablice protokola usmjeravanja prikazan je u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Tablica usmjeravanja čvora u mreži

Bit:	1	1	2	4	16	16	8	8
Polje:	fiksno	multicast	rezerv.	rezultat	odrAdr	sljHopAdr	rang	LQI

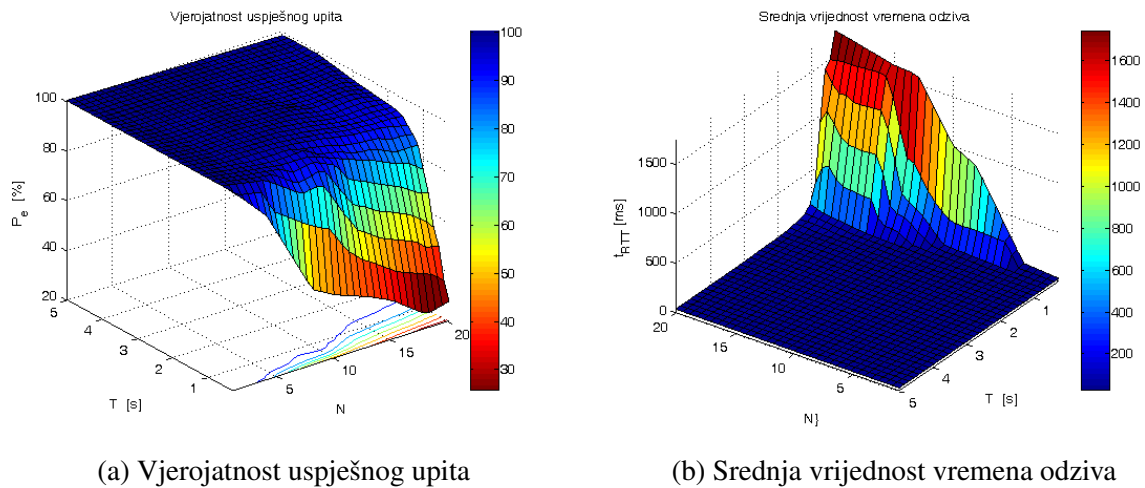
Jedan unos tablice usmjeravanja sastoji se od 63 bitova koji definiraju odredišnu adresu (*odrAdr*) te adresu sljedećeg skoka (*sljHopAdr*). Ova dva unosa bitna su za prosljeđivanje paketa kroz mrežu na način da čvor koji primi paket koji treba preusmjeriti odabire sljedeći skok u mreži na temelju unosa u tablicu usmjeravanja. Od ostalih polja u tablici susreće se polje *fiksno* i *multicast* koja označavaju da li je unos fiksno (tj. unos se ne može promijeniti) te da li je unos vezan za multicast adresu. Unos *rezultat* (engl. *score*) označava koliko je unos valjan, tj. koliko je spomenuti put "dobar". Ukoliko ovo polje dođe do vrijednosti nula, unos se briše iz tablice usmjeravanja jer se pretpostavlja da spomenuti put kroz mrežu nije dovoljno dobar za daljnje korištenje. S druge strane, polje *rang* govori o tome koliko je često unos korišten za usmjeravanje. U slučaju da je tablica usmjeravanja puna, a potrebno je dodati novi unos, unos sa najmanjim rangom će se prebrisati novim unosom. Naposljetku, zadnje polje označava kvalitetu linka (*LQI*) paketa koji je primljen od čvora sa adresom *sljHopAdr*. U slučaju da se primi novi unos s istom odredišnom adresom (*odrAdr*), ukoliko je kvaliteta linka bolja od prethodnog unosa trenutni unos će se prebrisati novim.

Isto tako, o tome da li će čvor usmjeravati paket ili ne odlučuje mrežni sloj, u ovisnosti o adresi čvora. Time se mogu definirati koji čvorovi u mreži su usmjerivački čvorovi, a koji čvorovi su krajnji čvorovi u mreži. Protokol usmjeravanja moguće je i onemogućiti, što će se koristiti u ispitivanju komunikacije u topologijama s jednim skokom.

Kako usmjeravanje podatka nije u primarnom fokusu ove disertacije, protokol usmjeravanja se neće detaljnije opisivati, te se detaljan opis principa rada može pogledati u [89].

3. **Potvrda slanja paketa s kraja na kraj (engl. *end-to-end*)** - svaki paket koji se šalje s izvorišnog čvora prema odredišnom čvoru se potvrđuju mrežnim ACK (engl. *ACKnowledgement*) paketom. Odredišni čvor šalje ACK paket s mrežnog sloja prema izvorišnom čvoru kako bi se potvrdio primitak paketa s kraja na kraj. Nakon primitka (ili u slučaju da ACK nije primljen) izvještava se sljedeći viši sloj o uspjehu/neuspjehu slanja paketa.

Ekspperimentalna analiza ovog komunikacijskog protokola u laboratorijskom okruženju pokazuje da je vjerojatnost uspješnog upita daleko veća za veći broj čvorova u mreži, a kašnjenja su smanjena. U prvom dijelu prikazan je površinski dijagram vjerojatnosti uspješnog upita i vremena odziva u ovisnosti o broju čvorova u mreži i maksimalnoj vrijednosti vremena između uzastopnih upita na slici 4.13.



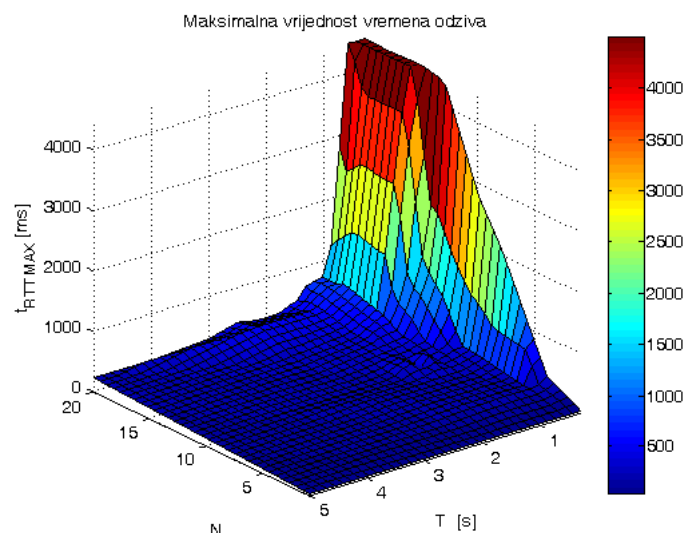
Slika 4.13. Ekspperimentalno vrednovanje hibridnog modela koordinacije i LWM protokola

Ispitivanje LWM protokola pokazalo je da za spomenuti model komunikacije u jednostavnoj zvijezda topologiji s 20 čvorova i intenzitetom generiranja upita svakog čvora od $\lambda = 4$ upita/s vjerojatnost uspješnog upita iznosi svega 0,38 dok srednje vrijeme odziva (vrijeme od slanja upita do primitka odgovora) iznosi 1377 ms. Iz preliminarnog istraživanja komunikacije vidljivo je da su u kritičnim uvjetima mrežne performanse loše te je potrebno poboljšanje mrežnih uvjeta i samim time poboljšanje QoS u mreži. Razlog ovomu jest ograničena obrada senzorskog čvora te zagušenje na komunikacijskom kanalu, čemu je zaslužan problem dijeljenog medija (RF kanal).

Vidljivo je kako kašnjenje u eksponencijalnoj mjeri ovisi o maksimalnom vremenu između slanja uzastopnih upita, dok s druge strane povećanje broja čvorova u mreži nema toliko izražen utjecaj na povećanje vremena odziva. Naposljetku, zadnja metrika predstavlja maksimalno vrijeme odziva u mreži koja je prikazana na slici 4.14.

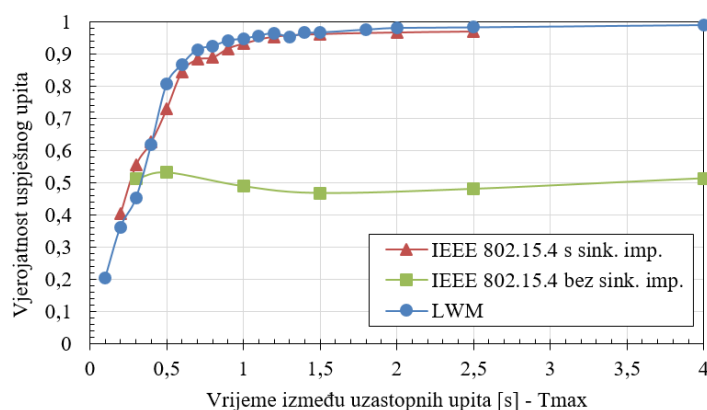
4.3.4. Usporedba postojećih protokola komunikacije

Kao što je opisano u prethodnim poglavljima, postojeći standardi i protokoli nisu prikladni za primjenu u BSAM. Zbog prikazanih problema u komunikaciji za spomenuti komunikacijski model utvrđeno je da nedostaje sustavna analiza postojećih protokola u podržavanju hibridnog modela koordinacije orijentiranog na upit od strane senzorskih čvorova u BSAM.



Slika 4.14. Maksimalno vrijeme odziva u ovisnosti broju čvorova u mreži i maksimalnoj vrijednosti vremena između uzastopnih upita - eksperiment

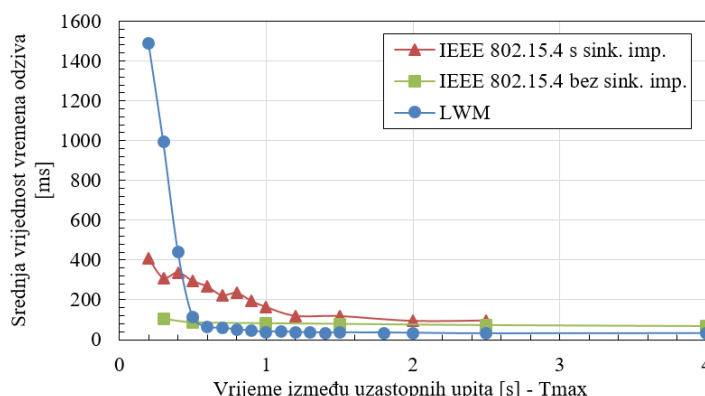
Ukoliko se usporede tri analizirana protokola prema vjerojatnosti uspješnog upita i vremena odziva moguće je iz šire perspektive predložiti poboljšanje postojećih protokola za primjenu u BSAM. Na slici 4.15 usporedno su prikazane vjerojatnosti uspješnog upita u BSM za različite vrijednosti intenziteta generiranja upita (vrijeme između uzastopnih upita) za sva tri protokola u scenariju s 10 čvorova u mreži.



Slika 4.15. Usporedba IEEE 802.15.4 MAC protokola s LWM protokolom u hibridnom modelu koordinacije - vjerojatnost uspješnog upita za $N = 10$

Iz prikazanog dijagrama moguće je izravno zaključiti kako IEEE 802.15.4 protokol u načinu rada bez sinkronizacijskog impulsa nije primjenjiv za BSAM i hibridni model koordinacije jer ostvaruje daleko najmanju vjerojatnost uspješnog upita. S druge strane, spomenuta vjerojatnost za način rada sa sinkronizacijskim impulsom i LWM protokol je gotovo identična (uzimajući u obzir statističku pogrešku). Iz spomenutih vjerojatnosti vidljivo je da s povećanjem vremena između

uzastopnih upita vjerojatnost raste, dok u slučajevima velikog intenziteta generiranja upita zbog zagušenja dolazi do odbacivanja paketa i neuspješnog dohvaćanja odgovora na zadani upit.



Slika 4.16. Usporedba IEEE 802.15.4 MAC protokola s LWM protokolom u hibridnom modelu koordinacije - srednja vrijednost vremena odziva za $N = 10$

Ukoliko se sva tri protokola sagledaju s aspekta vremena odziva u mreži, dijagram koji usporedno prikazuje sva tri protokola i njihove vrijednosti vremena odziva prikazan je na slici 4.16. Kao što je vidljivo na dijagramu vremena odziva, IEEE 802.15.4 u načinu rada bez sinkronizacijskog impulsa pokazuje manje vrijeme odziva nego način rada sa sinkronizacijskim impulsom, dok način rada bez sinkronizacijskog impulsa pokazuje najmanju pouzdanost upita. S druge strane, LWM protokol pokazuje daleko najmanje vrijeme odziva za slučaj kada mreža nije jako zagušena. U slučaju velikog zagušenja mreže LWM iznimno povećava vrijeme odziva, što predstavlja segment koji je potrebno unaprijediti poboljšanjem postojećeg protokola.

Iz prikazanog, evidentna je potreba za unapređenjem postojećih protokola komunikacije za primjenu u hibridnom modelu koordinacije orijentiran na upit od strane senzorskog čvora u bežičnim senzorskim i aktorskim mrežama, na način da isti povećaju QoS u mreži, u usporedbi s postojećim protokolima.

4.4. Simulacija hibridnog modela koordinacije za odabrani LWM protokol

Na temelju rezultata eksperimenta u prethodnom potpoglavlju može se zaključiti kako LWM protokol predstavlja najbolje rješenje za primjenu u BSAM i hibridnom modelu koordinacije. Zbog njegovog otvorenog stoga i implementacije u C programskom jeziku moguće su modifikacije protokola u obliku unaprijeđenja protokola i poboljšanja performansi za primjenu u BSAM i hibridnom modelu koordinacije. Ovim se omogućuje sinteza novog komunikacijskog protokola, što nije moguće s IEEE 802.15.4 protokolom.

Kako bi se predložena poboljšanja LWM protokola mogla simulacijski vrednovati, iznimno je bitno predložiti simulacijski model LWM protokola i razvijenog senzorskog i akterskog čvora. Ovo je iznimno bitno zbog činjenice da u laboratorijskim uvjetima nije moguće analizirati mreže s nekoliko tisuća čvorova, te je potrebna procjena ponašanja mreže na temelju dobivenih podataka eksperimenta. Simulator korišten za simulaciju BSAM u ovoj disertaciji je OMNeT++ v4.3 s MiXiM okvirom, koji se temelji na generiranju diskretnih događaja.

4.4.1. Opis simulacijskog okruženja

Dizajnirani BSAM čvor potrebno je preslikati iz stvarnog svijeta u simulaciju. Kako bi se spomenuto omogućilo svi parametri protokola i parametri sklopovlja čvora su ujednačeni u simulaciji i dizajniranom čvoru. To uključuje parametre osjetljivosti prijemnika i snage predajnika, parametri CSMA/CA algoritma pristupa mediju, parametri veličine međuspremnik na podsloju pristupa mediju i sl. Prema hibridnom modelu koordinacije sekundarne parametre vremena odziva potrebno je modelirati empirijski iz realne mreže kako bi se utvrdile njihove početne vrijednosti za simulaciju. U tom postupku korišteno je predloženo okruženje te su statistički određene srednje vrijednosti i standardne devijacije prema standardnoj razdiobi, za oba parametra.

Dobiveni parametri statističke analize ugrađeni su u simulacijski model na način da su kasnjenja definirana kao slučajne varijable *Gauss*-ove razdiobe sa srednjim vrijednostima i standardnim devijacijama empirijski određenim.

Kako bi se omogućila simulacija sa što manjim odstupanjima od eksperimenta, parametri simulacije su postavljeni jednako kao i parametri dizajniranog čvora te je prilagođen simulacijski model fizičkog sloja prema fizičkom sloju temeljenom na AT86RF231. Korišteni parametri simulacije prikazani su u tablici 4.4.

S obzirom da je predložena jednostavna topologija zvijezde bez usmjeravanja, protokol usmjeravanja nije implementiran. U prvom scenariju simulacije analizirano je na koji način broj čvorova i vrijeme između slanja upita (označeni sa * u tablici 4.4) utječe na tri osnovne metrike QoS-a. Aspekt energetske učinkovitosti nije razmatran u simulaciji. Simulacija predloženog okruženja i modela koordinacije provedena je kroz nekoliko scenarija, gdje su se u svakom idućem scenariju parametri označeni sa * inkrementirani ekvidistantno unutar predloženih opsega. Što se tiče parametra vremena između slanja dva upita, parametar razmaka vremena između uzastopnih upita se odnosi na maksimalno vrijeme između dva slanja, definiran prema uniformnoj razdiobi. Kada senzorski čvor šalje upit, on isti šalje svakih t sekundi, gdje je t slučajna varijabla uniformne razdiobe

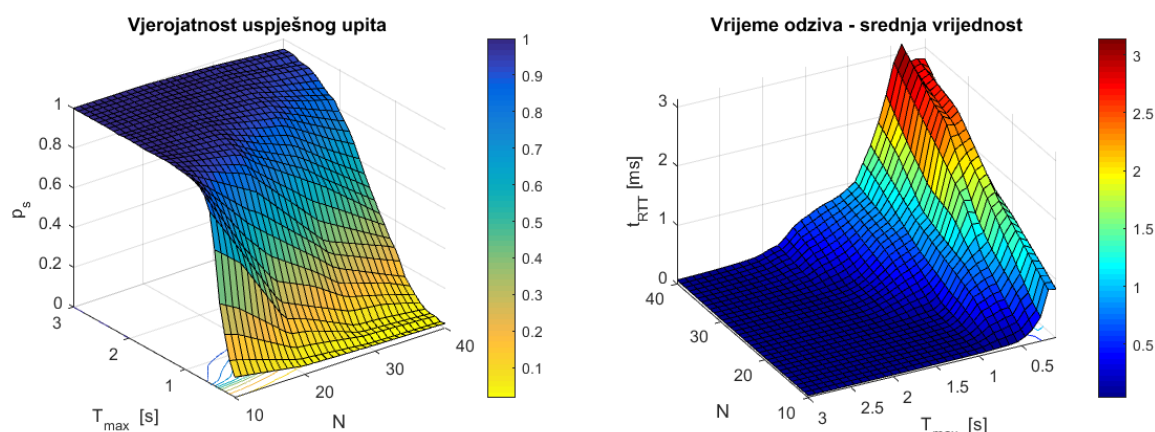
Tablica 4.4. Parametri simulacije za hibridni model koordinacije prema slojevima (protokolni stog)

Aplikacijski sloj - APP	Vrijednost
Vrijeme između slanja upita - T	uniform (0,1 s - 3,0 s) *
Veličina paketa upita	100 B
Broj poslanih upita	100
Podsloj pristupa mediju - MAC	Vrijednost
macMaxFrameRetries	11
macMaxCSMABackoffs	5
macMaxBE	5
macMinBE	3
Veličina međuspremnika	20 pck
Fizički sloj - PHY	Vrijednost
EkspONENT gubitka puta	2
Broj čvorova - n	10 - 40 *
Model propagacije	Log-normal
Snaga odašiljanja	20 dBm
Osjetljivost prijmnika	-105 dBm

s maksimalnom vrijednosti definiranom s T_{max} .

Rezultat simulacije jest skup podataka koje je moguće prikazati u trodimenzionalnom obliku površinskih dijagrama. Rezultati ovog istraživanja objavljeni su u radu [77]. Tijekom simulacije izvršeno je 550 ponavljanja simulacija za različite kombinacije parametara označenih sa * što je rezultiralo s više od 680000 vrijednosti parametara, iz kojih su pomoću jednadžbi (4-3), (4-4) , (4-5) određene metrike QoS-a, što daje 1650 podatkovnih točaka na tri prikazana površinska dijagrama. Vjerojatnosti između dobivenih točaka interpolirane su kubičnom *spline* metodom interpolacije. Prva analizirana metrika jest vjerojatnost uspješnog upita i dobiveni površinski dijagram vjerojatnosti prikazan je na slici 4.17a.

Iz prikazanog površinskog dijagrama vjerojatnosti uspješnog upita može se zaključiti da za manji broj čvorova i za manji interval između slanja upita vjerojatnost uspješnog upita iznosi gotovo 100 %. Ovo je očekivano zbog malog zagušenja u mreži pri čemu se ne očekuju gubitci paketa. Također, u slučaju gubitka paketa zbog interferencije, algoritam pristupa mediju koji koristi detekciju nosioca uz izbjegavanje kolizije (CSMA/CA) te će ostvariti retransmisiju MAC okvira, za okvir za koji nije primljena potvrda primitka u definiranom vremenu. U uvjetima povećanja broja čvorova u mreži ili smanjenja intervala između uzastopnih upita vjerojatnost uspješnog upita počinje opadati. Ovaj učinak se izravno pripisuje zagušenju u mreži i utjecaju dijeljenog medija za



(a) Vjerojatnost uspješnog upita

(b) Srednja vrijednost vremena odziva

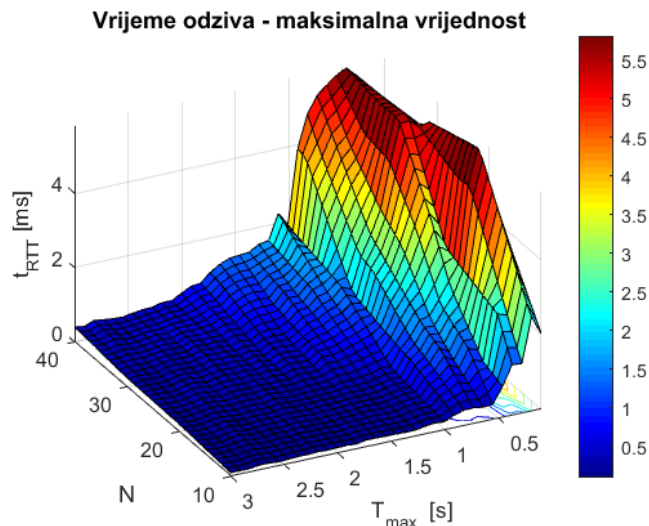
Slika 4.17. Simulacija hibridnog modela koordinacije za LWM protokol u ovisnosti o broju čvorova u mreži i maksimalnoj vrijednosti vremena između uzastopnih slanja paketa

komunikaciju. Daljnjim povećanjem broja čvorova, tj. smanjenjem intervala između uzastopnih upita opada i vjerojatnost uspješnog upita, što rezultira vjerojatnošću od svega 10 % za situaciju s 25 čvorova i intervalom između slanja upita od 0,3 s.

Sljedeći parametar koji je analiziran je vrijeme odziva. Kao što je definirano u poglavlju 4.2, vrijeme odziva predstavlja vrijeme potrebno da se upit propagira prema bazi podataka i da na upit čvor dobije odgovor. U postupku pružanja kvalitete usluge vrijeme odziva predstavlja bitan čimbenik koji mora biti dovoljno maloga iznosa kako bi omogućio rad željene aplikacije. No, treba imati na umu da je vjerojatnost uspješnog upita ipak primarna metrika i krajnji cilj je maksimizacija vjerojatnosti uspješnosti upita. Na slici 4.17b prikazan je površinski dijagram vremena odziva u ovisnosti o broju čvorova i maksimalnom intervalu između uzastopnih upita te je vidljivo da vrijeme odziva ne ovisi linearno o broju čvorova niti maksimalnom intervalu između uzastopnih upita. Naime, u području kada mreža funkcionira u optimalnim uvjetima (nema zagušenja, nema velikog prometa) vrijeme odziva je poprilično konstantno i iznosi manje od 50 ms. Kada se u mreži pogoršaju uvjeti i dođe do zagušenja vrijeme odziva eksponencijalno se povećava u ovisnosti maksimalnoj vrijednosti intervala između slanja paketa. S druge strane, broj čvorova u mreži nema toliko izražen utjecaj na vrijeme odziva. Naime, povećanje vremena odziva pri povećanju broja čvorova izravna je posljedica čekanja podataka u repu međuspremnika i ponovljenim retransmisijama okvira CSMA/CA algoritma. Što se broj čvorova u mreži povećava, to se broj uspješnih upita smanjuje, no ukupno vrijeme odziva se neće povećavati eksponencijalno. Treba napomenuti da zbog malog broja uspješnih upita pri spomenutim uvjetima postoji dovoljno velika pogreška.

Naposljetku, posljednja metrika koja je predložena je maksimalno vrijeme odziva RTT_{max} .

Ova metrika je definirana kao maksimalno vrijeme odziva dobiveno iz vremena svih upita u mreži. Spomenuta metrika definira najgori slučaj mreže, tj. koliko će biti najveće moguće vrijeme odziva u nekoj konfiguraciji i koristi se u slučajevima definiranja maksimalne vrijednosti vremena odziva stroge ili prilagodljive stvarno-vremenske komunikacije (engl. *hard and soft real-time*). Maksimalno vrijeme odziva u ovisnosti o istim parametrima prikazano je na slici 4.18.



Slika 4.18. Maksimalno vrijeme odziva u ovisnosti broju čvorova u mreži i maksimalnoj vrijednosti vremena između uzastopnih slanja paketa - simulacija

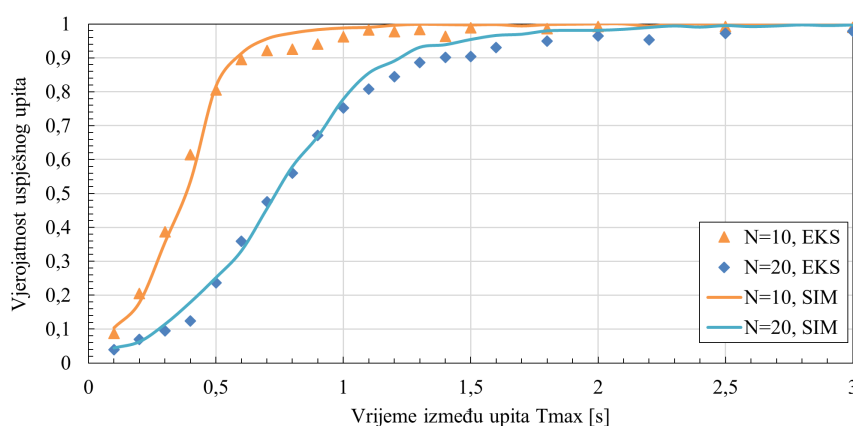
Maksimalno vrijeme odziva u sličnoj mjeri ovisi o broju čvorova i maksimalnom intervalu između slanja upita, uvećano po iznosu. Kao i kod srednje vrijednosti vremena odziva, za porast broja čvorova ne pokazuje se intenzivno povećanje maksimalnog vremena odziva, dok smanjenje vremena između upita eksponencijalno povećava maksimalno vrijeme odziva.

Iz simulacija topologije zvijezde u BSAM prikazano je da se povećanjem broja čvorova u mreži i povećanjem intenziteta slanja upita u mreži smanjuje vjerojatnost uspješnog upita i povećava vremena odziva, kao što je dobiveno u eksperimentu. Budući da je krajnji cilj maksimizirati vjerojatnost uspješnog upita i minimizirati vremena odziva, u velikim BSAM koje sadrže nekoliko tisuća čvorova ovaj zadatak će biti izrazito kompliciran.

Isto tako, budući da je metodologija simulacije mreže jedino prihvatljiva u slučaju eksperimentalnog vrednovanja predloženog scenarija i malog odstupanja simulacije i eksperimenta, iznimno je bitno usporediti dobivene rezultate simulacije s eksperimentom u jednakim uvjetima (uvjetima predloženog okruženja za eksperimentalno ispitivanje). Stoga će se pristupiti eksperimentalnom vrednovanju predložene topologije.

4.4.2. Analiza odstupanja rezultata simulacije od eksperimenta

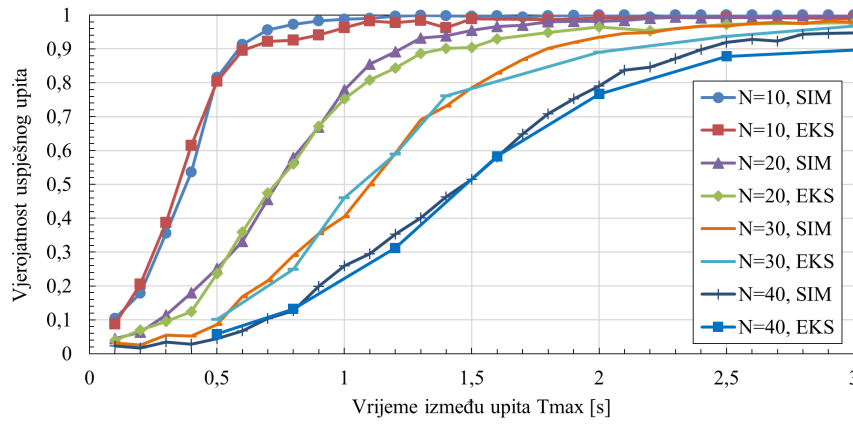
Kako bi se omogućilo poboljšanje postojećeg modela simulacije (što će za cilj dati smanjenje odstupanja rezultata) potrebno je usporediti hibridni model koordinacije i simulacijski i eksperimentalno. U prvom koraku usporediti će se postojeći podatci simulacije s podacima eksperimenta za jedan slučaj, tj. kritični slučaj eksperimenta sa $N = 10$ i 20 čvorova. Analiza će biti provedena s aspekta vjerojatnosti uspješnog upita u mreži. Usporedni dijagram simulacije (puna linija) i eksperimenta (markeri trokut i pravokutnik) za vjerojatnost uspješnog upita i maksimalnu vrijednost vremena između slanja uzastopnih upita prikazan je na slici 4.19.



Slika 4.19. Usporedba vjerojatnosti uspješnog upita eksperimenta i simulacije za $N=10$, 20 aktivnih čvorova

Iz inicijalnog mjerenja može se zaključiti kako simulacija dobro opisuje eksperiment dok odstupanja simulacije i eksperimenta nisu značajna. Pri izvođenju eksperimenta uzimani su razmaci između maksimalnog vremena upita od 0,1 s, dok je u inicijalnoj simulaciji taj razmak 10 ms. Ovim se dobiva izgled podataka simulacije koji više priliči modelu nego diskretnim podacima. Ovo je prikazano radi vizualne demonstracije odstupanja u ovoj usporedbi.

Kako bi se napravila reprezentativna usporedba simulacije i eksperimenta, i simulacija i eksperiment su ponovljeni za iste vrijednosti T_{max} , kako bi se vrijednosti mogle preklopiti i izračunati odstupanje. Simulacija i eksperiment je napravljen za mreže sa 10 do 40 čvorova te maksimalno vrijeme između slanja upita od 0,1 s do 3 s. Usporedni rezultati simulacije i eksperimenta prikazani su na slici 4.20.



Slika 4.20. Usporedba vjerojatnosti uspješnog upita eksperimenta i simulacije za $N=10-40$ aktivnih čvorova

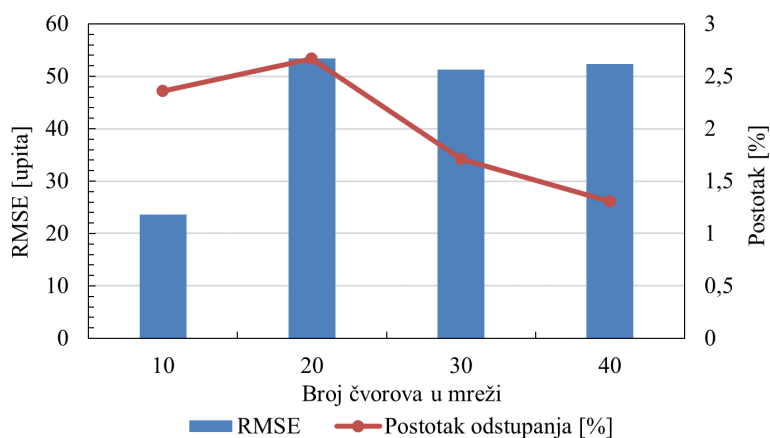
Iz prikazanog dijagrama može se vidjeti točno odstupanje simulacije i eksperimenta za scenarij od 10, 20, 30, i 40 čvorova u mreži. Na dijagramu su usporedno prikazani svi podatci te se na prvi pogled može vidjeti kako simulacija u svim rasponima broja čvorova i vremena između upita T_{max} jako dobro opisuje izvršeni eksperiment u laboratorijskim uvjetima. Također, za veće vrijednosti T_{max} (u slučaju manjeg zagušenja mreže) evidentno je kako postoji odstupanje između simulacije i eksperimenta, no ta razlika u velikoj većini slučajeva ne prelazi 5%. Također se iz dijagrama može se vidjeti kako se povećanjem broja čvorova ne povećava odstupanje između simulacije i eksperimenta.

Za provjeru navedenog odabrana je kvantitativna metrika korijena srednje kvadratne pogreške (engl. *Root Mean Square Error*, RMSE) koja se često koristi u usporedbi dvaju skupova, te ocjeni koliko dobro model predviđanja opisuje eksperiment. Metriku korijena srednje kvadratne pogreške možemo definirati kao [90]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (c_i - \bar{c}_i)^2} \quad (4-9)$$

gdje je $\bar{c}_i$ predviđena vrijednost (vrijednost iz simulacije), dok je c_i stvarna vrijednost iz eksperimenta. Analizirane vrijednosti iz simulacije i eksperimenta su vrijednosti vjerojatnosti uspješnog upita. Kako bi se izbjegla problematika računanja RMSE metrike koristeći vjerojatnosti uspješnog upita, u RMSE analizu kao ulazni parametar je uzet ukupan broj uspješnih upita u mreži. Tako dobiven RMSE označava grešku između simulacije i eksperimenta u ukupnom broju paketa u mreži. Izračunatu pogrešku moguće je normirati po čvoru u mreži kao $RMSE/N$, čime se dobiva pogreška u broju upita, za jedan čvor u mreži. Ukoliko se dobivena pogreška za jedan čvor podjeli s brojem

odaslanih upita tog čvora, dobiva se greška (odstupanje) simulacije i eksperimenta u postotcima, za jedan čvor. Dobivene metrike RMSE prikazane su na slici 4.21.



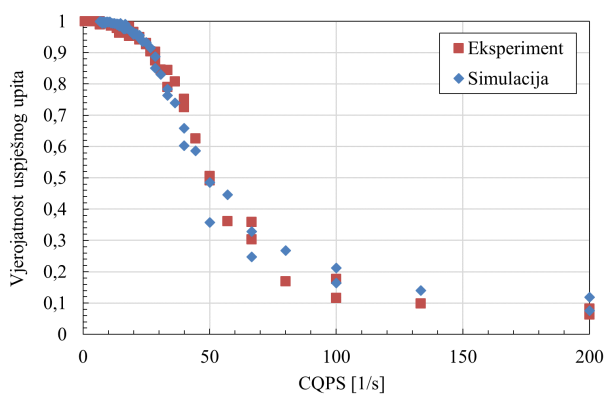
Slika 4.21. Usporedba simulacije i eksperimenta na temelju RMSE i postotka odstupanja

Prema dijagramu na slici može se zaključiti kako na razini cijele mreže za slučaj od 10 čvorova u mreži RMSE pogreška iznosi 23,6 upita. Ovo znači da na razini cijele mreže za slučaj sa 10 čvorova u mreži i različite vrijednosti vremena odziva postoji razlika između eksperimenta i simulacije od 25,6 upita. Budući da mreža ima 10 čvorova ova se pogreška može normirati po jednom čvoru, što rezultira prosječnom pogreškom od 2,56 upita za svaki čvor. Kako čvor šalje ukupno 100 upita, moguće je ovu normiranu vrijednost prikazati u postotcima, što daje postotnu pogrešku između modela (simulacije) i eksperimenta od 2,56%, za slučaj sa 10 čvorova u mreži.

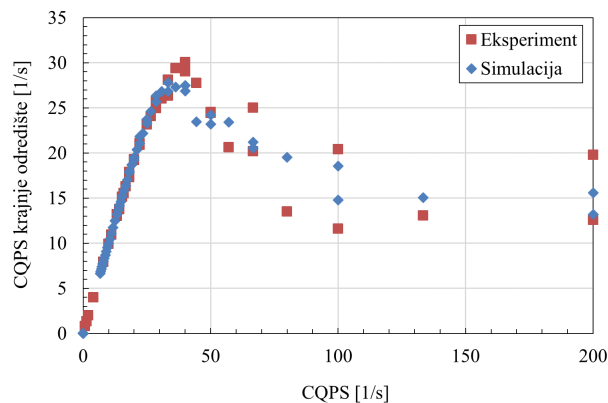
Na isti način moguće je odrediti pogrešku i za ostale scenarije (slika 4.21). Stoga se prema dijagramu može zaključiti kako je za veći broj čvorova u mreži RMSE pogreška konstantna u određenom intervalu, te ne dolazi do povećanje pogreške s povećanjem broja čvorova u mreži. Ovo potvrđuje grafičku analizu. Isto tako, budući da se pogreška po čvoru normira na temelju broja čvorova u mreži, povećanjem broja čvorova ova pogreška (odstupanje) simulacije i eksperimenta se smanjuje. Maksimalna pogreška (odstupanje) simulacije i eksperimenta iznosi 2,7 %, što je ispod prije navedenih 5 % razlike, kako je uočeno i na dijagramima na slici 4.20.

Ukoliko se ova usporedbu simulacije i eksperimenta prenese u domenu broja generiranih ukupnih upita u sekundi u cijeloj mreži (CQPS), moguće je dobiti dijagram vjerojatnosti uspješnog upita za bilo koju kombinaciju broja čvorova u mreži i maksimalnog vremena upita T_{max} (vidi jednadžbu 4-8), kao CQPS dijagram prikazan na slici 4.22a.

Prikazani CQPS dijagram vjerojatnosti uspješnog upita prikazuje karakteristiku prema kojoj se može zaključiti kako vjerojatnost uspješnog upita opada s povećanjem CQPS-a, tj. povećanjem



(a) Vjerojatnost uspješnog upita



(b) Vrijednost CQPS na krajnjem odredištu

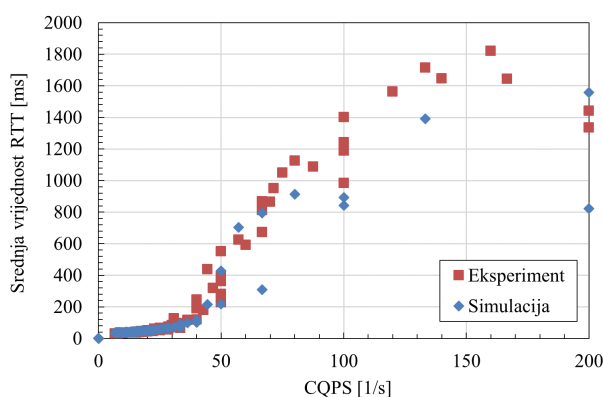
Slika 4.22. Usporedba vjerojatnosti uspješnog upita i vrijednosti CQPS na krajnjem odredištu eksperimenta i simulacije u ovisnosti o generiranoj CQPS vrijednosti

ukupnog broja upita u mreži u sekundi. Na dijagramu su usporedno prikazane točke dobivene iz mjerenja i simulacije, te se može zaključiti kako simulacija dobro prati eksperiment, kako je pokazano i u prethodnim prikazima. Prednost upotrebe CQPS dijagrama jest mogućnost predviđanja uvjeta u mreži i kvalitete usluge na temelju dobivene karakteristike (o čemu će biti govora kasnije u disertaciji).

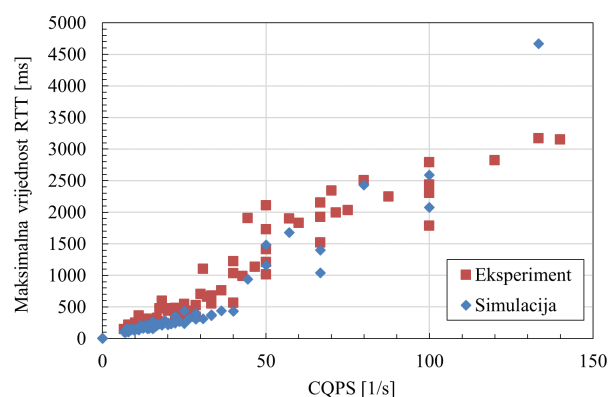
Nadalje, isti dijagram moguće je prikazati na strani krajnjeg odredišta u mreži, gdje se može analizirati odnos generiranog CQPS-a (vrijednost koju svi čvorovi u mreži generiraju), s obzirom na stvarnu vrijednost CQPS-a (tj. broj upita u sekundi koji su uspješno realizirani - na upit je dobio odgovor). Slika 4.22b prikazuje ovaj dijagram gdje je moguće analizirati kako se povećanjem generiranog CQPS prometa stvarna CQPS vrijednost linearno povećava sve do točke zagušenja, kada mreža više ne može učinkovito prosljeđivati upite, zbog zagušenja dijeljenog medija i zagušenja krajnjeg odredišta u mreži (detaljno opisano u sljedećem potpoglavlju). Ovdje treba uočiti kako simulacija dobro opisuje eksperiment.

CQPS dijagram moguće je prikazati i za metriku vremena odziva u mreži, te je isti prikazan na slici 4.23 za srednju vrijednost i maksimalnu vrijednost vremena odziva (prema predloženim metrikama u poglavlju 4.2).

Slika 4.23a prikazuje srednju vrijednost vremena odziva simulacije i eksperimenta gdje se može vidjeti kako simulacija dobro opisuje eksperiment, za vrijednosti CQPS-a manje od 50. Iznad spomenute vrijednosti povećava se rasipanje vrijednosti i eksperimenta i simulacije te je vrlo nezhvalno komentirati mogućnost predviđanja vremena odziva u tim uvjetima. Također, općenito se može zaključiti kako su vremena odziva u eksperimentu nešto veća nego vremena u simulaciji, što pokazuje kako se u uvjetima zagušenja (retransmisije paketa, odbacivanja i otežanog pristupa me-



(a) Srednja vrijednost



(b) Maksimalna vrijednost

Slika 4.23. Usporedba vremena odziva eksperimenta i simulacije u ovisnosti o CQPS vrijednosti

diju) vrlo teško može modelirati sama komunikacija. No, ono što se može zaključiti jest činjenica da je trend simulacije i eksperimenta jednak, u pogledu povećanja vremena odziva (i smanjenja kvalitete usluge) pri povećanju ukupnog broja upita u mreži u sekundi. Sličan zaključak se može dati i za metriku maksimalnog vremena odziva (slika 4.23b) gdje se uočava razlika u simulaciji i eksperimentu. Maksimalne vrijednosti vremena odziva su nešto veće u eksperimentu nego u simulaciji, no smanjenje zagušenja u mreži (smanjenje generiranog CQPS-a) smanjuje i kašnjenje i u simulaciji i u eksperimentu, stoga se može zaključiti kako je trend jednak.

4.4.3. Prijedlog poboljšanja kvalitete usluge u BSAM primjenom višekanalne arhitekture i višedrežne topologije

U predloženom hibridnom modelu koordinacije cilj je osigurati kvalitetu usluge povećanjem vjerojatnosti uspješnog upita i minimizacijom vremena odziva u mreži. Pregledom postojećih standarda za upotrebu u BSAM donesen je zaključak kako od tri predložena protokola i standarda, protokol LWM osigurava najmanje vrijeme odziva i najveću vjerojatnost uspješnog upita u scenarijima kad u mreži ne vlada veliko zagušenje.

S druge strane, u uvjetima kada je broj čvorova velik i vrijeme između slanja uzastopnih upita malo, događa se zagušenje u mreži što dovodi do degradacije performansi. Ova degradacija performansi očekivana je jer mreža dolazi do granice propusnosti na aplikacijskom sloju, te se paketi koji se nalaze u redovima počinju odbacivati. Ovo se može najbolje vidjeti iz prikazanih CQPS dijagrama, gdje se povećanjem broja upita u sekundi na razini cijele mreže performanse degradiraju (slika 4.22a). Zbog spomenutog dolazi i do povećanja kašnjenja u mreži što rezultira povećanjem vremena odziva u mreži. Isto tako, moguće je odrediti točku nakon koje mreža više ne ostvaruje

planiranu propusnost, što se može vidjeti na slici 4.22b. Dijagram pokazuje problem zagušenja i problem uskog grla u mrežama koje imaju samo jedno odredište [91, 92, 93]. Prema dijagramu može se zaključiti kako je vrijednost CQPS-a za 30 maksimalna vrijednost generiranog prometa pri kojoj mreža može vršiti učinkovitu komunikaciju. Stoga se postavlja pitanje na koji način smanjiti ovaj problem uskog grla u mreži?

Jedno rješenje koje se često susreće u literaturi jest topologija mreže koja sadrži više krajnjih odredišta u mreži [94, 95, 96]. Ovaj pristup primijenjen je vrlo često u mrežama kojima je velika vjerojatnost gubitka paketa (engl. *Lossy Networks*) gdje se ostvaruje poboljšanje redundancije i pouzdanosti same mreže [97]. Isto tako, u prijedlogu hibridnog modela koordinacije predložena je topologija s više krajnjih odredišta u mreži, zbog aspekta pouzdanosti u slučaju kvara u jednom segmentu mreže.

No kako bi se poboljšale performanse mreže sa strane propusnosti i zagušenja na dijeljenom mediju, uvođenje dodatnih krajnjih odredišta ne rješava ovaj problem u potpunosti. Naime, s obzirom da je medij komunikacije RF medij koji je dijeljeni medij, svi čvorovi u mreži moraju koristiti isti medij kako bi ostvarili komunikaciju. U tom slučaju uvođenje dodatnih krajnjih odredišta ne smanjuje zagušenje komunikacijskog kanala jer je komunikacijski kanal isti za sve čvorove.

Kako bi se ovaj problem riješio potrebno je odvojiti komunikacijske kanale različitih krajnjih odredišta u mreži, što se postiže primjenom višekanalne arhitekture [98]. U ovom slučaju koristi se svojstvo radijskih primopredajnika čvorova da odabiru kanale na kojima žele komunicirati. S obzirom da su kanali frekvencijski odvojeni, rješava se problem upotrebe zajedničkog kanala za sve čvorove. No, iako je na prvi pogled ova arhitektura jednostavna ona iziskuje vrlo promišljeni pristup, zbog raznih problema koji se pojavljuju primjenom ove arhitekture.

Sukladno navedenom, u okviru ove disertacije, područje istraživanja je usmjereno na analizu i prijedlog protokola komunikacije za poboljšanje kvalitete usluge u bežičnim senzorskim i aktor-skim mrežama te predloženom hibridnom modelu koordinacije primjenom višekanalne arhitekture i višeodredišne topologije.

4.5. Zaključak poglavlja

Razvojem BSAM pojavljuju se nove aplikacije koje traže visoku pouzdanost mreže, mala kašnjenja i zalihost mreže. Tu se ističu primjene i aplikacije u području industrijske automatizacije. Jedna primjena uključuje komunikaciju orijentiranu na upit od strane akterskog čvora koja se temelji na činjenici da akterski čvorovi šalju upite (engl. *query*) prema centru za obradu, očekujući odgovor na upit. Primjer ovih aplikacija može se pronaći u robotskim sustavima, taktičkim primjenama i sl., gdje roboti šalju upite o određenom postupku prema centru obrade i zahtijevaju odgovor na postavljeni upit u što kraćem vremenu. U cilju uspostave učinkovite BSAM nužna je primjena postojećeg modela koordinacije u BSAM, koji nisu primjenjivi za nove aplikacije i primjene BSAM.

Zbog navedenog, pokazuje se potreba za prijedlogom novog modela koordinacije u BSAM - hibridnog modela koordinacije. Predloženi model koordinacije temelji se na spoju postojećih metoda koordinacije, gdje se integrira polu-automatski centralizirani model sa senzor-aktor koordinacijom i aktor-aktor koordinacijom. Dobivenom arhitekturom omogućuje se distribuirana obrada podataka, na način da se podaci od aktora u mreži prosljeđuju prema centrima za odlučivanje, koji se nalaze izvan BSAM.

Na temelju hibridnog modela koordinacije predložene su metrike kvalitete usluge koje opisuju značajke komunikacije. To su vjerojatnost uspješnog upita, vrijeme odziva te maksimalno vrijeme odziva. Vjerojatnost uspješnog upita definira vjerojatnost da će se na odaslani upit dobiti odgovor, dok vrijeme odziva definira vrijeme koje je proteklo od slanja upita do primitka odgovora na upit. Metrike su definirane kolektivno, čime se definira ponašanje cijele mreže (a ne samo jednog čvora u mreži). Osim metrika u hibridnom modelu koordinacije definiran je i CQPS pokazatelj, koji govori o broju generiranih upita u cijeloj mreži, predstavljajući pokazatelj zagušenja mreže.

Kako bi se ispitala kvaliteta usluge u hibridnom modelu koordinacije napravljeno je mjerenje performansi postojećih protokola. Zaključeno je kako postojeći protokoli ne jamče kvalitetu usluge u slučaju zagušenja, što predstavlja otvoreni problem područja. Također, pokazano je kako LWM protokol predstavlja najbolje rješenje za upotrebu u hibridnom modelu koordinacije, zbog mogućnosti unaprijeđenja protokolnog stoga. Stoga je isti odabran kao rješenje za unaprijeđenje i prilagodbu hibridnom modelu koordinacije.

Kako bi se omogućilo unaprijeđenje LWM protokola za isti je izrađen simulacijski model u simulatoru OMNeT++. Dobiveni podaci iz simulacije uspoređeni su s mjerenjem te je izračunata pogreška odstupanja simulacije i eksperimenta koristeći RMSE metriku. Zaključeno je kako od-

stupanje simulacije i eksperimenta ne prelazi 3 %, pri čemu je ostvarena dobra korelacija metrika kvalitete usluge između simulacije i eksperimenta.

Naposljetku, razmotrene su metode poboljšanja kvalitete usluge u predloženom hibridnom modelu koordinacije gdje je donesen zaključak kako se primjenom višekanalne arhitekture i višeodređišne topologije u BSAM može postići poboljšanje performansi, točnije, smanjenje zagušenja na dijeljenom mediju i poboljšanje vjerojatnosti uspješnog upita. Ovo rezultira poboljšanjem kvalitete usluge u mreži. No zbog specifičnosti hibridnog modela koordinacije potrebna je sustavna analiza metoda koje se koriste za uspostavu višekanalne arhitekture i višeodređišne topologije s ciljem prijedloga novog komunikacijskog protokola.

5. VIŠEKANALNA ARHITEKTURA I VIŠEODREDIŠNA TOPOLOGIJA U BSAM

Višekanalna arhitektura u bežičnim mrežama predstavlja arhitekturu koja omogućuje poboljšanje performansi jednostavnim principom distribucije opterećenja mreže na više dostupnih kanala. Ovim postupkom smanjuje se nastalo zagušenje mreže čime se poboljšavaju performanse i samim time, kvaliteta usluge u mreži. No, iako se na prvi pogled ovaj postupak čini jednostavnim, sama implementacija i problemi koji se javljaju pri uporabi višekanalne arhitekture nisu trivijalni. Sličan scenarij se događa i primjenom višoodredišne topologije. Kako je opisano u prethodnom poglavlju uporabom višoodredišne topologije moguće je distribuirati opterećenje između više krajnjih odredišta u mreži, čime se rješava problem uskog grla komunikacije (engl. *bottleneck*), no postavlja se pitanje upućivanja podataka prema pravom krajnjem odredištu u mreži. Stoga će se sve prednosti i nedostaci u korištenju predloženog rješenja za poboljšanje kvalitete usluge detaljno opisati i razložiti u okviru ove doktorske disertacije, te će se predstaviti postojeće višekanalne metode iz literature.

5.1. Osnove primjene i prednosti višekanalne arhitekture mreže

Višekanalna arhitektura je učinkoviti način smanjenja interferencije i zagušenja na bežičnom mediju principom omogućavanja paralelnih podatkovnih tokova na različitim frekvencijskim kanalima s ciljem povećavanja propusnosti mreže [99]. Zbog činjenice da današnji radijski primopredajnici (npr. AT86RF231, koji je sastavni dio bežičnih čvorova) mogu vrlo jednostavno promijeniti radni frekvencijski kanal, korištenje višekanalne komunikacije vrlo je jednostavno omogućeno.

5.2. Problematika višekanalne arhitekture

Komunikacija u višekanalnoj arhitekturi vrlo je zahtjevna zbog činjenice da se zahtijeva implementacija u uređaje s ograničenim resursima (kao što su bežični senzorski čvorovi). Kako cijena sklopovlja opada danas se pojavljuju bežični čvorovi sa višestrukim primopredajnicima i kompleksnom arhitekturom koja izlazi iz okvira senzorskih mreža. Čak i pojavom senzorskih i aktorskih mreža tendencija bi trebala biti na očuvanju jednostavnosti, male cijene i visoke pouzdanosti ovakvih čvorova. Stoga, naglasak ove disertacije je stavljen na čvorove koji se sastoje od jednog radijskog primopredajnika (s mogućnošću promjene kanala), gdje je naglasak dan na jednostavnost i pouzdanost implementacije višekanalnih protokola.

U višekanalnoj arhitekturi pojavljuju se razni problemi koji ne postoje u klasičnim jednokanalnim arhitekturama [100]. Zbog činjenice da je disertacija orijentirana pružanju kvalitete usluge u bežičnim senzorskim i aktorskim mrežama, u ovom poglavlju razmatrani su višekanalni problemi koji se izravno tiču spomenutog područja. Ovi problemi uključuju najčešće probleme bežičnog medija, i to:

1. **Višekanalni problem skrivenog/gluhog čvora** - Osim standardnog problema skrivenog čvora (u jednokanalnim mrežama) u višekanalnim mrežama pojavljuje se problem kad jedan čvor pokušava slati paket drugom čvoru, a čvorovi nisu ugođeni na isti frekvencijski kanal [101]. U tom slučaju poslani paket se neće isporučiti drugom čvoru, dok će prvi čvor vršiti retransmisiju paketa i time zagušivati dijeljeni medij.
2. **Problem dodjeljivanja/promjene kanala** - Kako je opisano u prethodnom problemu, kako bi se uspostavila komunikacija između čvorova oba čvora moraju biti na istom kanalu. Tu se pojavljuje problem dodjeljivanja kanala u mreži te na koji način vršiti promjene kanala tijekom rada [100]. Također, treba imati na umu da promjena kanala traje određeno vrijeme, tijekom kojega radijski prijemnik nije raspoloživ. Stoga je potrebno minimizirati broj promjena kanala u nekoj mreži te kanale mijenjati sukladno uvjetima u mreži.
3. **Stabilnost komunikacijskih kanala** - Komunikacijski kanali (linkovi) u bežičnim senzorskim (i aktorskim) mrežama su vrlo nepredvidivi jer su podložni djelovanju *fadinga*-a i ostalih radijskih nepravilnosti u mreži. Rezultat je degradacija performansi mreže i stvaranje otoka odvojenih od ostatka mreže [102]. Spomenuto je pokazano u jednom od prethodnih istraživanja, objavljeno u članku [103].
4. **Samoadaptivnost protokola** - Zbog same prirode nepredvidljivih komunikacijskih kanala u bežičnim mrežama višekanalni protokol mora imati mogućnost adaptacije na novonastale uvjete u mreži, na način da zaobilazi kanale na kojima nije moguće uspostaviti pouzdanu komunikaciju ili kanale koji su zagušeni. Ova sposobnost je jako bitna kako bi protokol mogao učinkovito funkcionirati u raznim uvjetima u mreži, omogućujući primjenu u realnim scenarijima.
5. **Problem broja kanala u mreži** - Iako trenutni radijski primopredajnici imaju mogućnost korištenja više kanala (do 16 kanala) postavlja se pitanje optimalnog broja kanala i odabira kanala, zbog pojave međukanalne interferencije. Također, povećanjem broja kanala u mreži povećava se i zauzeće radijskog spektra, pa i taj aspekt treba imati na umu prilikom planiranja mreže [104].

6. **Ograničena propusnost kanala** - Propusnost kanala u bežičnim senzorskim (i aktorskim) mrežama je vrlo mala i smanjuje se kako se broj čvorova u mreži povećava, stoga je vrlo bitno učinkovito koristiti propusnost kanala, što je dakako najviše izraženo kod čvorova u blizini krajnjeg odredišta u mreži.
7. **Skalabilnost** - Povećanjem veličine mreže (gledano s aspekta broja čvorova) višekanalni protokol mora omogućavati prilagodbu povećanom broju čvorova u mreži, te se ne smije dogoditi da povećanje broja čvorova smanjuje učinkovitost višekanalnog protokola.

Iz nabrojenih problema može se zaključiti kako višekanalna problematika nikako nije trivijalna, te prilikom predlaganja novih rješenja treba dobro sagledati postojeće probleme te pristupe u rješavanju istih.

5.3. Višekanalni protokoli za BSM

Tijekom desetak godina koliko je područje bežičnih senzorskih mreža aktualno pojavio se veliki broj predloženih protokola koji koriste višekanalnu arhitekturu kako bi poboljšali performanse mreže. U tom aspektu pojavljuju se različite klase protokola, različite implementacije i različite inačice čiji se broj danas broji u stotinama. Kako je pregled postojećih protokola iznimno bitan za ocjenu primjenjivosti u hibridnom modelu koordinacija, prvi dio uključuje područje bežičnih senzorskih mreža. Razlog ovome jest činjenica kako su bežične senzorske i aktorske mreže podskup bežičnih senzorskih mreža, stoga je logičan smjer pregled osnovnog skupa, nakon čega će područje biti suženo na BSAM.

U cilju kategorizacije višekanalnih protokola predloženo je nekoliko taksonomija, od kojih je jedna podjela prema načinu dodjele kanala. Prema spomenutoj podjeli, dodjeljivanje kanala čvorovima u mreži može se razložiti na tri kategorije [99, 105]:

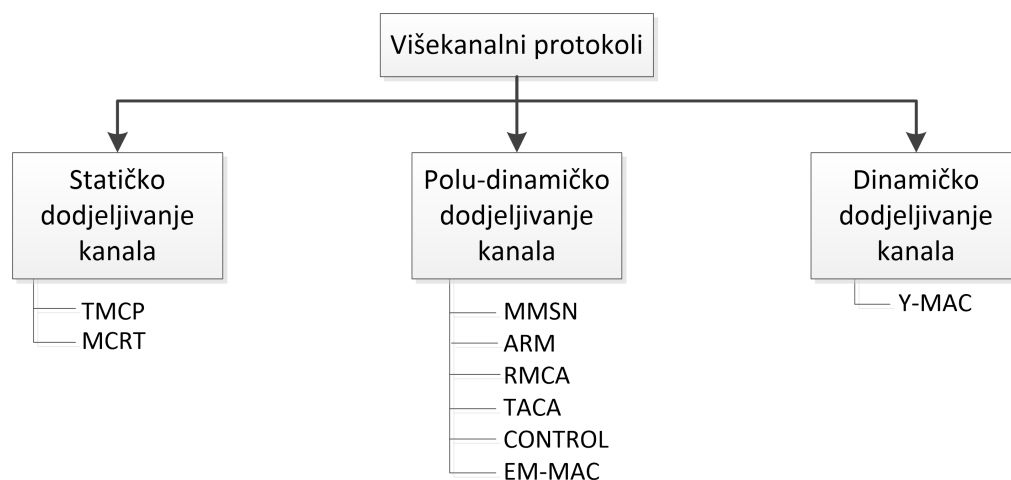
1. **Statičko dodjeljivanje kanala** - temelji se na statičkom zadavanju kanala čvorovima, koje se ne mijenja tijekom rada mreže. Glavni zagovornici statičkog dodjeljivanja kanala objašnjavaju kako za mreže koje su deterministički postavljene, sa znanim izvorima smetnji (kao npr. Wi-Fi pristupne točke) i znanim podatkovnim tokovima korištenih aplikacija moguće je definirati statičku konfiguraciju mreže. Stoga se prilikom postavljanja mreže mogu definirati potrebni kanali koji se neće dalje mijenjati. No treba naglasiti kako se pojam statički odnosi na vrijeme između promjene kanala. Točnije, vrijeme između promjene kanala u mreži nije veće od vremena propagacije, kašnjenja ili promjene kanala. Stoga, protokoli koji se temelje na statičnom dodjeljivanju kanala ne moraju tijekom cijelog vremena rada mreže

koristiti isti kanal, ali će ga koristiti kroz duži vremenski period. Primjer ovih protokola uključuju TMCP [106] i MCRT [107] protokole koji statički dodjeljuju kanale i vrše partitioniranje mreže. Problem kod statičkog dodjeljivanja kanala nastaje prilikom promjene topologije mreže (zbog nastalih smetnji u mreži, zagušenja, zasjenjivanja radijskog signala i sl.) gdje se performanse ovih protokola drastično smanjuju. Isto se može zaključiti u slučaju povećanja broja čvorova u mreži kada je potrebno ponovo izvršiti dodjeljivanje kanala, što predstavlja pristup koji nije skalabilan. Naposljetku, ovaj pristup također nije primjenjiv za aplikacije koje generiraju nepoznatu količinu prometa, zbog činjenice da se mreža planira prema procijenjenom prometu aplikacija u mreži.

2. **Dinamičko dodjeljivanje kanala** - predloženo je kao alternativa statičkom dodjeljivanju kanala s ciljem smanjenja utjecaja interferencije komunikacijskih kanala i dinamičnosti topologije na performanse protokola. Kod dinamičkog dodjeljivanja kanala dolazi do vrlo česte promjene kanala u mreži, najčešće prije započinjanja postupka slanja. Ovim pristupom donose se točnije odluke o korištenju kanala u mreži na temelju pokazatelja, čime se povećavaju performanse mreže, uz cijenu povećanog kontrolnog prometa. Motivacija za predlaganje ove metode dodjeljivanja kanala spada u dvije kategorije: **problematika varijacije kanala** i **problematika promjene količine prometa**. U prvoj kategoriji problematika se razlaže na problematiku pouzdanosti mreže, gdje se izdvaja varijacija kanala i interferencija kao glavni problem smanjenju pouzdanosti mreže, a cilj su industrijske primjene bežičnih senzorskih mreža s visokom pouzdanošću. U drugoj kategoriji problematika se svodi na aplikacije u mreži čiji promet nije točno definiran, nego se mijenja. U ovakvih uvjetima statičko dodjeljivanje kanala ne rezultira dobrim performansama. Stoga je cilj svakog dinamičkog višekanalnog protokola smanjenje varijacije kanala i promjene količine prometa u mreži kako bi se poboljšale performanse. No, pojavljuje se problem kako uskladiti da čvor koji šalje i čvor koji prima koriste isti kanal? U protivnom se pojavljuje višekanalni problem skrivenog/gluhog čvora što dovodi do degradacije performansi. Kako bi se ovaj problem riješio protokoli najčešće koriste vrlo strogu sinkronizaciju, koja troši dodatne resurse u mreži. Primjer je Y-MAC protokol [108]. Naposljetku, ovaj pristup može omogućiti veliku propusnost mreže ali i povećano kašnjenje zbog dugog vremena promjene kanala, čime primjena u stvarno-vremenskim aplikacijama nije moguća.
3. **Polu-dinamičko dodjeljivanje kanala** - predstavlja novi trend u protokolima dodjeljivanja kanala, gdje se uz smanjene kontrolne tokove ostvaruje visoka sposobnost prilagodbe na va-

rijacije kanala i promjene količine prometa. Cilj ovih protokola je smanjenje broja promjena kanala na način da se dodjeljivanje i promjena kanala odvijaju periodički ili na temelju događaja. Najčešće se primjenjuju pristupi gdje se cijela mreža promatra kao homogena mreža (u ovisnosti o količini prometa). Tako u ovaj pristup pripadaju protokoli: MMSN [109], ARM [110], RMCA [111], CONTROL [112], EM-MAC [113] i dr. S druge strane, manji broj protokola diferencira čvorove s obzirom na količinu prometa i na taj način na čvorovima koji generiraju veliku količinu prometa primjenjuje statičko dodjeljivanje kanala, dok na ostale primjenjuje dinamičko dodjeljivanje kanala [114]. Polu-dinamičko dodjeljivanje kanala omogućuje veću prilagodljivost promjenama prometa u mreži te nastalim interferencijama, dok u isto vrijeme smanjuje veća kašnjenja uzrokovana promjenama kanala. Stoga je ovaj pristup primjenjiv za mreže koje zahtijevaju visoku pouzdanost, malo kašnjenje kao što su mreže primjenjive u industriji i okruženjima koja zahtijevaju stvarno-vremensku komunikaciju.

Iz prikazanih postupaka promjene kanala izdvojeni su protokoli predstavnici, i isti se mogu taksativno prikazati na slici 5.1.



Slika 5.1. Taksonomija višekanalnih protokola

Sukladno prikazanoj taksonomiji u nadolazećim potpoglavljima za svaku kategoriju opisani su protokoli predstavnici, njihove značajke i nedostaci.

5.3.1. Statičko dodjeljivanje kanala

U kategoriji statičkog dodjeljivanja kanala nalaze se protokoli TMCP i MCRT.

TMCP je statički višekanalni protokol temeljen na topologiji stabla. Primarna primjena mu je prikupljanje podataka od senzora [106]. Ideja protokola je particioniranje mreže u više paralelnih

stabala, i samim time smanjenje uzajamne interferencije između stabala, na način da svako stablo koristi drugi frekvencijski kanal. Protokol podržava promet od čvorova prema krajnjem odredištu u mreži no problem nastaje u slučaju potrebe za razasićanjem (zbog različitih kanala u upotrebi). Ovaj protokol predlaže uporabu višedrežne topologije, u izvedbi krajnjeg odredišta s više frekvencijskih kanala. Natjecanje unutar grana stabla nije detaljno riješeno jer čvorovi komuniciraju na istom kanalu, stoga se postavlja pitanje učinkovitog pristupa mediju.

MCRT protokol se temelji na višekanalnoj arhitekturi koja je uvjetovana tokovima u mreži [107]. Naime, protokol koristi definirane podatkovne tokove u mreži i svakom podatkovnom toku dodjeljuje drugi frekvencijski kanal s ciljem minimizacije interferencije. Dodjeljivanje kanala vrši se pomoću teorije grafova gdje se traže putovi kroz mrežu koji se ne preklapaju. Kako bi se spomenuto realiziralo predložen je algoritam određivanja putova. MCRT podržava kvalitetu usluge u mreži. Prednost ovog protokola jest što se definira čvrsta granica kašnjenja u mreži, čime se ostvaruje vrlo malo kašnjenje. No problematika ovog pristupa nastaje pri promjenjivom prometu i promjenjivoj topologiji mreže, što inače predstavlja problem za postupak statičkog dodjeljivanja kanala.

Navedeni protokoli predstavnici kategorije statičkog dodjeljivanja kanala imaju nekoliko zajedničkih nedostataka koji su vezani za mreže koje su varijabilne (u smislu prometa i topologije). U takvim situacijama predloženi protokoli ne ostvaruju dobre performanse, stoga je uporaba ovih protokola ciljana na mreže koje su statički postavljene te koje nemaju velike varijacije u prometu (kao npr. BSM za daljinsko očitavanje brojila, nadzor okolišnih parametara i sl.)

5.3.2. Dinamičko dodjeljivanje kanala

U kategoriji dinamičkog dodjeljivanja kanala susrećemo protokol Y-MAC kao predstavnik kategorije.

Y-MAC je predstavnik dinamičkog dodjeljivanja kanala temeljen na pristupu prema rasporedu (engl. *sheduled access*), osmišljen za BSM. Princip rada ovog protokola jest zadavanje vremenskih odsječaka (slotova) čvorovima koji primaju podatke. Na početku vremenskog odsječaka vrši se nadmetanje potencijalnih čvorova koji trebaju poslati podatak, za slanje podatka na medij. Vremenski odsječak je dovoljno dugačak za slanje jednog paketa, stoga čvorovi koji trebaju poslati više paketa zajedno sa čvorom koji prima podatke "skaču" na drugi frekvencijski kanal pomoću prije definirane sekvence (engl. *frequency hopping*). Prednost ove metode je dodjeljivanje točno onoliko kanala koliko je potrebno, u ovisnosti o zagušenju mreže. Problem ovog protokola je faza

nadmetanja na početku vremenskog odsječka koja ne eliminira koliziju na mediju u slučaju kad se potencijalni čvorovi koji odašilju međusobno ne čuju. Također, postojanje perioda za nadmetanje tijekom kojega se ne šalju informacije smanjuje propusnost i učinkovitost mreže. Naposljetku, zbog povećanog prometa oko krajnjeg odredišta u mreži može doći do degradacije performansi zbog učestalih kolizija na kanalu [108].

5.3.3. Polu-dinamičko dodjeljivanje kanala

U kategoriji polu-dinamičkog dodjeljivanja kanala susreće se 6 protokola predstavnika područja, i to: MMSN, AMR, RMCA, CONTROL, EM-MAC.

MMSN protokol je višekanalni MAC protokol temeljen na nadmetanju (engl. *contention based*). Pristup mediju se temelji na CSMA s vremenskim odsječcima (slotovima). Svaki odsječak sadrži period za razošiljanje i period za slanje podataka, za koji se čvorovi nadmeću. Svaki čvor ima dodijeljeni frekvencijski kanal za primanje podataka te koristi algoritam njuškanja kanala (engl. *snooping*) kako bi detektirao dolazeće pakete na raznim kanalima. Prednost MMSN protokola je manje kašnjenje i veća propusnost, no samo za manje vrijednosti prometa u mreži. U slučaju većeg prometa broj kolizija i natjecanja se povećavaju. Problem kod MMSN protokola leži u činjenici da svaki čvor ima dodijeljeni fiksni kanal za primanje podataka, što predstavlja problem pri promjeni topologije i u konačnici uzrokuje lošije performanse [109].

ARM se može svrstati kao predstavnik protokola koji koriste ciklički način rada (engl. *duty-cycling*) uštede energije [110]. On koristi metodu kontrolnog kanala u mreži za razmjenu informacija o dodjeljivanju kanala određenim čvorovima i rješava problem zagušenja kontrolnog kanala te problem trostrukog skrivenog čvora. Prilikom buđenja čvora iz spavanja čvor započinje komunikaciju na kontrolnom kanalu na način da stohastički odabire optimalni kanal za komunikaciju s vjerojatnošću p . Zbog činjenice da ovaj protokol koristi ciklički način rada, kašnjenja u mreži su povećana. Stoga se ovo rješenje ne može koristiti u primjenama gdje je potrebno malo kašnjenje.

RMCA protokol je jedan od novijih protokola koji koristi tehniku *Regret-Matching* iz porodice teorija igara u cilju distribuirane optimizacije dodjeljivanja kanala [111]. Cilj ovog protokola je maksimizacija broja primljenih paketa, minimizacija kašnjenja i minimizacija interferencije, što rezultira poboljšanjem performansi mreže. Dodjeljivanje kanala je modelirano kao igra, dok su čvorovi u mreži igrači a dostupni kanali su moguće akcije čvorova. RMCA podržava kvalitetu usluge u mreži. Kroz mjerenja i simulacije pokazano je kako RMCA poboljšava performanse u mreži, u usporedbi s drugim protokolima, no sama validacija performansi napravljena je na

maksimalno 7 tokova u mreži. U slučaju većeg broja tokova i kritičnog scenarija postavlja se pitanje kako bi se protokol ponašao. Postavlja se i pitanje prilagodljivosti ovog protokola u slučaju smanjene stabilnosti komunikacijskog linka i promjeni topologije mreže. Isto tako, iako je jedan od rijetkih protokola koji je eksperimentalno vrednovan, isto je provedeno na mreži od samo 16 čvorova, što dovodi u pitanje skalabilnost protokola.

CONTROL protokol predložen je kao rješenje protokola za pristup mediju koji koristi teoriju upravljanja s ciljem poboljšanja performansi mreže [112]. Kod ovog protokola dodjeljivanje kanala se vrši periodički, a odluka o promjeni kanala se donosi stohastički s vjerojatnošću p . Spomenuta vjerojatnost dobiva se putem teorije upravljanja i uspješnosti susjednih čvorova da pristupe kanalu. Ova uspješnost računa se periodički na način da svaki čvor u mreži periodički razašilje paket $\langle s, f \rangle$, gdje s označava koliko puta je čvor uspješno pristupio kanalu, a f broj neuspjelih pokušaja. Iz dobivenih paketa svaki čvor računa vjerojatnost zagušenja kanala oko sebe, što predstavlja ulazni parametar u integralni član. Pri nastalom zagušenju čvorovi mijenjaju frekvencijski kanal "prema gore", dok se smanjenjem zagušenja čvorovi vraćaju dolje na osnovni kanal. Ovaj protokol rezultira u poboljšanju performansi, uz povećanje kontrolnog prometa (paketi $\langle s, f \rangle$). Protokol je vrednovan kroz simulaciju i eksperiment i jedan je od rijetkih protokola koji koriste višedrežnu topologiju mreže s ciljem distribucije opterećenja i problema uskog grla na krajnjem odredištu u mreži. Nedostatak ovog protokola je brzina promjene kanala koja može biti spora zbog integralnoga člana i potrebe za akumulacijom vjerojatnosti prije promjene kanala.

EM-MAC protokol predstavlja tehniku dodjeljivanja kanala koja je inicirana od strane prijarnika [113]. Ovaj protokol koristi dodjeljivanje kanala temeljeno na pseudo slučajnom rasporedu kanala na način da čvorovi koji šalju podatke predviđaju vrijeme kad će se određeni čvor probuditi. S druge strane, ne predlaže se mehanizam smanjenja redundantnih slanja istih poruka ili kolizija na podsloju pristupu mediju, što dovodi do povećane potrošnje energije i degradacije performansi u slučaju jačeg zagušenja u mreži.

Prikaz svih navedenih protokola prema njihovim značajkama prikazan je u tablici 5.1 [98].

Tablica 5.1. Prikaz višekanalnih protokola u bežičnim senzorskim mrežama

Protokol	Dodjeljivanje kanala	Pristup mediju	Simulacija eksperiment	QoS	Razina sloja	Arhitektura
TMCP	Statičko	CSMA/CA	sim+eksp	Ne	MAC	Centralizirana
MCRT	Statičko	CSMA/CA	sim	Da	NWK	Centralizirana
Y-MAC	Dinamičko	TDMA	sim	Ne	MAC	Distribuirana
MMSN	Polu-dinamičko	CSMA/CA	sim	Ne	MAC	Distribuirana
ARM	Polu-dinamičko	CSMA/CA	sim+eksp	Ne	MAC	Distribuirana
RMCA	Polu-dinamičko	CSMA/CA	sim+eksp	Da	MAC	Distribuirana
CONTROL	Polu-dinamičko	CSMA/CA	sim+eksp	Da	MAC	Distribuirana
EM-MAC	Polu-dinamičko		eksp	Ne	MAC	Distribuirana

Prema taksonomiji vidljivo je kako se navedeni protokoli mogu svrstati u još nekoliko dodatnih kategorija, prema načinu njihovog rada. Tako je moguće definirati način pristupu mediju koji se koristi, i to najčešće CSMA/CA i TDMA. Kod CSMA/CA čvorovi pristupaju mediju metodom nadmetanja i ovaj pristup je vrlo često korišten u praksi (koristi se i u standardu IEEE 802.15.4). S druge strane, TDMA pristup zahtijeva naprednu modifikaciju podsloja pristupa mediju, stoga ga nije moguće koristiti u sklopovskim rješenjima koja podržavaju CSMA/CA i IEEE 802.15.4, kao ni u predloženom hibridnom modelu koordinacije. Nadalje, protokole je moguće podijeliti i prema razvijenosti sa strane simulacije i eksperimenta. Za protokole koji su vrednovani pomoću simulacije i eksperimenta se može zaključiti kako su napredniji sa strane provjere njihovog poboljšanja performansi. Isto tako, neki protokoli imaju integriran aspekt kvalitete usluge u mreži, pa su takvi protokoli primjenjivi za hibridni model koordinacije koji zahtijeva kvalitetu usluge u mreži. Sa strane samog djelovanja protokola, isti se mogu podijeliti prema razini sloja na kojemu se vrši postupak dodjeljivanja kanala. U ovoj kategoriji susreće se podsloj pristupa mediju (MAC) i mrežni sloj (NWK). Naposljetku, kod arhitekture samog višekanalnog protokola razlikujemo centraliziranu i distribuiranu arhitekturu, te se iz prethodnih diskusija može zaključiti kako je tendencija novih i naprednih protokola decentralizacija i distribuirano dodjeljivanje kanala.

5.4. Višekanalni protokoli za BSAM

Iz prethodnog poglavlja može se zaključiti kako u BSM postoji veliki broj višekanalnih protokola koji imaju različite ciljeve, dok nekolicina protokola stavlja naglasak na kvalitetu usluge u

višeodredišnoj topologiji. No postavlja se pitanje podrške višekanalnoj arhitekturi u bežičnim senzorskim i akterskim mrežama (BSAM). Jedan od primjera može se vidjeti u članku [115] gdje su prikazane osnove višekanalne komunikacije u BSAM. Nadalje, sličan no detaljniji pristup problematici višekanalne arhitekture u BSAM predstavljaju autori u [116] gdje se analizira poboljšanje performansi koristeći višekanalnu arhitekturu s višestrukim prijamnicima. U ovoj arhitekturi čvorovi imaju više prijamnika te se samim time omogućuje paralelan rad na različitim frekvencijskim kanalima. U spomenutom radu pokazuje se poboljšanje performansi, no postavlja se pitanje može li trošak dodatnog sklopovlja opravdati poboljšanje performansi?

Sličan pristup predlažu autori u [117] no u ovom slučaju koristi se usporedba višekanalne i jednokanalne arhitekture, kod čvorova s jednim primopredajnikom. U ovom radu pokazano je kako višekanalna arhitektura ima velike prednosti nad jednokanalnom arhitekturom u BSAM, no autori ne predlažu novo rješenje koje poboljšava postojeće višekanalne protokole. Isto tako, autori koriste IEEE 802.11 standard kao osnovu podsloja pristupa mediju i fizičkog sloja, koji nije korišten u BSAM.

Danas se pojavljuju rješenja višekanalne komunikacije koja koriste postojeće protokole i standarde. Primjer je **ZenSens** koji koristi IPv6 arhitekturu mreže i višekanalnu arhitekturu [118]. Ovo rješenje koristi postojeće standardne protokole kao što su IPv6, 6LowPan i IEEE 802.15.4 s ciljem uspostave bežične komunikacije, dok se autori fokusiraju na međusloj (engl. *middleware*). U ovom konceptu višekanalna arhitektura se ne odnosi na frekvencijske kanale, nego na kanale vizualizacije. Stoga treba odvojiti spomenuti pristup od svih ostalih spomenutih jer ovaj pristup ne pridonosi poboljšanju performansi u mreži, ali ga treba navesti kao postojeće rješenje.

S druge strane, protokol koji se koristi za poboljšanje performansi koristeći višekanalnu arhitekturu frekvencijskih kanala (u istom aspektu kao i prethodnom poglavlju) je **ROD-SAN**. Autori u [119, 120] predlažu novu arhitekturu za BSAM nazvana ROD-SAN, gdje se kao i u prethodnim primjerima koristi arhitektura s više primopredajnika. U ovom slučaju uz primarni primopredajnik postavlja se dodatni primopredajnik čija zadaća jest buđenje čvora tijekom faze spavanja. Sekundarni prijamnik je osmišljen kao jako učinkovit, zbog čega troši vrlo malo energije i ne koristi se za razmjenu podatkovnih paketa. Ova arhitektura predlaže razmjenu kontrolnih informacija pomoću sekundarnih prijamnika s ciljem dodjeljivanja kanala. Za dodjeljivanje kanala predložena je ACS metoda koja koristi podatak o korištenju trenutnih kanala kako bi donijela odluku o promjeni kanala. Promjena kanala se vrši stohastički pomoću vjerojatnosti p izračunate iz podatka o korištenju kanala. Postupkom simulacije pokazano je kako predložena ACS metoda ostvaruje

poboljšanje performansi mreže te smanjuje broj promjena kanala. Problem ove metode je dodatan trošak sklopovlja u obliku sekundarnog prijamnika.

IAMMAC predstavlja zadnji višekanalni protokol u **BSAM IAMMAC**. IAMMAC je inicijalno predložen kao **IDMMAC** i **ITMMAC** protokoli od istog autora, te predstavlja posljednji u nizu predloženih protokola autora (**ITMMAC**, **IAMMAC** i **IDMMAC**) [121, 122]. Ovaj protokol dodjeljuje kanal za svaki senzor u mreži s ciljem slanja podataka koordinatoru klastera, pri čemu se vrši senzor-aktor koordinacija. Nakon toga, aktor odabire kanal s minimalnom interferencijom i maksimalnom propusnošću za slanje podataka prema drugom akтору, pri čemu se definira aktor-aktor koordinacija. Kako bi se smanjio višekanalni problem skrivenog čvora svi čvorovi slušaju kontrolni kanal. Problem ovog protokola jest činjenica da aktori sadrže više radio primopredajnika, čime se smanjuje interferencija i omogućuje paralelno korištenje više komunikacijskih kanala. No problem dodatnog troška sklopovlja ostaje, kako i kod srodnih protokola.

5.5. Odabir višekanalne metode za primjenu u hibridnom modelu koordinacije

Prikazani višekanalni protokoli imaju za cilj poboljšanje performansi u mreži korištenjem višekanalne arhitekture. Sam pojam poboljšanja performansi različito se tumači u različitim protokolima, pa se tako osim klasičnih metrika (npr. učestalost pogreške, latencija i sl.) susreće pojam poboljšanja QoS-a i podrške QoS-u. Zbog činjenice da je cilj ove disertacije podrška kvalitete usluge u **BSAM** i hibridnom modelu koordinacije, potrebno je predložiti koji protokoli predstavnici područja bežičnih senzorskih mreža imaju mogućnost primjene u **BSAM**.

Nastavno tome potrebno je istaknuti nedostatke postojećih rješenja za primjenu u **BSAM**. Pa tako u protokolu **MMSN** susreće se problem degradacije performansi prilikom povećanog prometa, čime ovaj protokol ne zadovoljava uvjet visoke pouzdanosti u **BSAM** i hibridnom modelu koordinacije. Nadalje, **ARM** protokol stvara velika kašnjenja u mreži zbog upotrebe cikličkog načina rada (engl. *duty-cycling*), čime ovaj protokol ne zadovoljava uvjet niskog kašnjenja u mreži. Isto tako, kod protokola **EM-MAC** susreće se degradacija performansi mreže zbog slanja redundantnih podataka, čime se i ovaj protokol svrstava u kategoriju protokola koji nisu primjenjivi za **BSAM** i hibridni model koordinacije.

Protokoli **RMCA** i **CONTROL** definiraju poboljšanje kvalitete usluge i podršku kvaliteti usluge u **BSM**, čime postaju dobri kandidati za primjenu u **BSAM** i hibridnom modelu koordinacije. U usporedbi ova dva protokola najviše se ističu problemi skalabilnosti mreže i performansi protokola u

zagušenju koji se susreću kod RMCA protokola. U slučaju većeg broja tokova i kritičnog scenarija postavlja se pitanje performansi protokola jer već pri sedam paralelnih tokova u mreži performanse drastično opadaju. Postavlja se i pitanje prilagodljivosti ovog protokola u slučaju smanjene stabilnosti komunikacijskog linka i promjeni topologije mreže što može dovesti do dodatne degradacije performansi. Stoga je CONTROL protokol i njegova višekanalna metoda odabrana kao predstavnik područja višekanalnih protokola BSM-a, s mogućnošću primjene u BSAM i hibridnom modelu koordinacije.

S druge strane, pojavljuje se nekolicina protokola dizajniranih specifično za BSAM. U toj kategoriji susreću se protokoli ROD-SAN i IAMMAC. No nedostaci oba protokola su upotreba dodatnog sklopovlja u obliku radijskih primopredajnika. Pa tako ROD-SAN koristi sekundarni primopredajnik s ciljem buđenja čvorova i prijenosa kontrolnih podataka, dok IAMMAC koristi paralelne radijske primopredajnike kako bi omogućio jednostavniju višekanalnu senzor-aktor i aktor-aktor koordinaciju. Zbog činjenice da se u okviru ove disertacije stavlja naglasak na upotrebu aktorskih čvorova s jednim radijskim primopredajnikom, niti jedan od spomenutih protokola ne zadovoljava uvjete za primjenu u BSAM i hibridnom modelu koordinacije. No protokol ROD-SAN definira zanimljivu metodu promjene kanala nazvanu ACS koju je moguće primijeniti i u arhitekturi bez sekundarnog prijamnika, stoga je ROD-SAN i ACS metoda odabrana kao predstavnik protokola BSAM područja. U sljedećim poglavljima opisane su višekanalne metode CONTROL i ACS.

5.5.1. CONTROL metoda

CONTROL metoda predstavlja višekanalni dio CONTROL protokola i zadužena je za promjenu kanala u BSM. Ova metoda odabrana je kao predstavnik višekanalnih protokola u BSM jer inicijalno pokazuje dobra svojstva za upotrebu u BSAM i hibridnom modelu koordinacije [112].

Sa strane funkcionalnosti metode, ista definira kanale u mreži na način da su raspoređeni od F_0 , do F_N , gdje je N broj kanala u mreži. Pri inicijalizaciji mreže svi čvorovi komuniciraju na početnom F_0 kanalu. Ukoliko čvor otkrije kako u mreži postoji veliki broj izgubljenih paketa zbog kolizije i zagušenja u mreži, čvor će odlučiti o promjeni kanala. U CONTROL metodi svaki čvor u mreži periodički razaslije informacije prema ostalim čvorovima o zagušenju na kanalu. Informacija koja se razaslije ima oblik $\langle s, f \rangle$, gdje s označava koliko puta je čvor uspješno pristupio kanalu, a f broj neuspjelih pokušaja. Stoga, svaki čvor i periodički prima spomenuti paket od svojih susjeda u mreži j . Na temelju tih podataka čvor procjenjuje vjerojatnost da bilo

koji od svojih susjeda može uspješno pristupiti kanalu kao:

$$\alpha_i = \frac{\sum_j s_j}{\sum_j (s_j + f_j)} \quad (5-1)$$

Ukoliko je vrijednost α_i dovoljno mala može se zaključiti kako je kanal prenapučen oko čvora i . U tom slučaju vrijednost α_i označava interferenciju na mjestu čvora i . Stoga, ukoliko je α_i manje od zadane vrijednosti α_{ref} čvor će razmisliti o promjeni kanala s trenutnog kanala F_c na sljedeći kanal F_{c+1} s vjerojatnošću koja ovisi o uvjetima na kanalu. Uvođenje vjerojatnosti prilikom promjene kanala smanjuje fluktuacije između kanala koje u suprotnom mogu nastati ako čvorovi mijenjaju kanal u isto vrijeme. Vjerojatnost da čvor promjeni kanal sa trenutnog c na sljedeći $c + 1$ kanal označava se sa $\beta_{c,c+1}^i$. U predloženoj CONTROL metodi ova vjerojatnost raste s razlikom u kvaliteti između izvornog i odredišnog kanala.

Kako bi se mogli definirati uvjeti za promjenu kanala na viši ili na niži kanal, CONTROL metoda definira mehanizam "širenja" i "suženja" kanala. Mehanizam širenja kanala definira postupak kad čvorovi s nižeg kanala prelaze na više kanale, čime se mreža "širi" na ostale kanale, dok mehanizam suženja kanala definira reverzni proces, kada se čvorovi vraćaju na osnovni kanal i mreža se "sužava" na jednokanalnu mrežu. Oba mehanizma dizajnirani su kao regulator povratne veze teorije upravljanja, gdje je upravljački signal vjerojatnost da čvor promjeni kanal.

Mehanizam širenja kanala predstavljen je kao povratna veza. Vjerojatnost da čvor i promjeni kanal s trenutnog c kanala na $c + 1$, ako je $\alpha_{ref}^{up} > \alpha_c^i$ može se definirati kao [112]:

$$\beta_{c,c+1}^i(k) = \beta_{c,c+1}^i(k-1) + K_r^{up}(\alpha_{ref}^{up} - \alpha_c^i(k)) \quad (5-2)$$

gdje je k interval uzorkovanja, tj. broj uzorka između uzastopnih izračuna vjerojatnosti promjene kanala. Regulator je integralnog oblika te se vjerojatnost promjene kanala povećava sve dok je $\alpha_{ref}^{up} > \alpha_c^i$. U suprotnom slučaju, za $\alpha_{ref}^{up} \leq \alpha_c^i$ vjerojatnost promjene kanala se smanjuje s većim intenzitetom, i to kao [112]:

$$\beta_{c,c+1}^i(k) = \beta_{c,c+1}^i(k-1) - \hat{K}_r^{up}(\alpha_c^i(k) - \alpha_{ref}^{up}) \quad (5-3)$$

gdje je $\hat{K}_r^{up} > K_r^{up}$. Čvorovi mijenjaju kanal s trenutnog na sljedeći, u slučaju kada trenutni kanal postane zagašen.

Isto tako, potreban je mehanizam pomoću kojega se čvorovi vraćaju na niže kanale kada se količina prometa smanji - mehanizam suženja kanala. Analogno slučaju širenja kanala, u ovom

mehanizmu čvorovi se pozivaju za prelazak na niži kanal u slučaju kada je α manji od vrijednosti α_{ref}^{down}). Vjerojatnost da se kanal promjeni s kanala c na kanal $c - 1$, u slučaju da je $\alpha_{ref}^{down} > \alpha_c^i$ dana je kao [112]:

$$\beta_{c,c-1}^i(k) = \beta_{c,c+1}^i(k-1) + K_r^{down}(\alpha_c^i(k) - \alpha_{ref}^{down}) \quad (5-4)$$

U suprotnom slučaju, za $\alpha_{ref}^{down} \geq \alpha_c^i$ vjerojatnost se smanjuje većim intenzitetom, gdje je vjerojatnost promjene kanala dana kao [112]:

$$\beta_{c,c-1}^i(k) = \beta_{c,c+1}^i(k-1) - \hat{K}_r^{down}(\alpha_{ref}^{down} - \alpha_c^i(k)) \quad (5-5)$$

Bitan čimbenik u slučaju širenja i suženja kanala su pojačanja regulatora K_r^{up} i K_r^{down} koja definiraju koliko se agresivno promjena kanala vrši.

Kako bi se odabrali parametri regulatora za upotrebu ove metode u BSM i BSAM uz pomoć smjernica za odabir pojačanja regulatora [112] i na temelju ostalih znanstvenih članaka koji su uspoređivali CONTROL metodu [111, 123] predloženi su sljedeći parametri regulatora za primjenu u BSAM i hibridnom modelu koordinacije (Tablica 5.2)

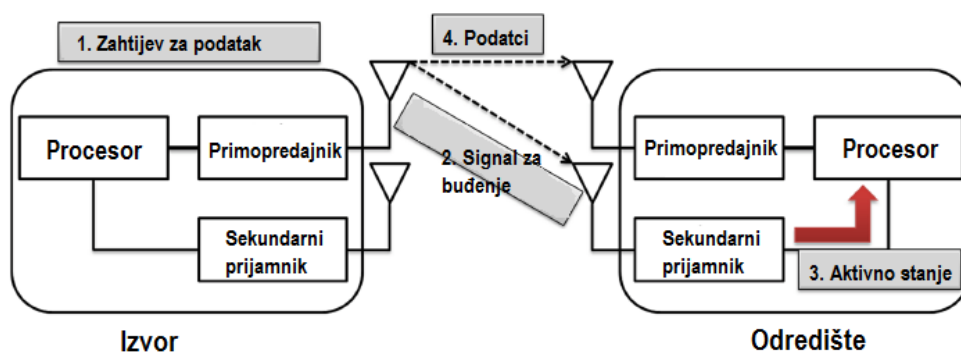
Tablica 5.2. Parametri regulatora CONTROL metode

parametar	Parametri po kanalima		
	Kanal #1	Kanal #2	Kanal #3
α_{ref}^{up}	0,80	0,4	0
α_{ref}^{down}	0,85	0,9	1
K_r^{up}	0,0375	0,075	0
$\hat{K}_r^{up}$	0,075	0,15	0
K_r^{down}	0,2	0,3	0
$\hat{K}_r^{down}$	0,3	0,4	0

Naposljetku, treba spomenuti kako CONTROL protokol definira i načine pridruživanja čvorova mreži, princip rada MAC sloja, usmjeravanje i sl., dok je u okviru ove disertacije korištena samo metoda promjene kanala, gore navedena iz razloga usporedbe metoda dodjeljivanja kanala u BSAM i hibridnom modelu koordinacije.

5.5.2. ROD-SAN i ACS metoda

Druga odabrana metoda za primjenu u BSAM i hibridnom modelu koordinacije je dio ROD-SAN (engl. *Radio On Demand - Sensor and Actuator Network*) arhitekture predložene za bežične senzorske i aktorske mreže [119, 120]. Predložena ROD-SAN arhitektura je razvijena kako bi pružila pristup na zahtjev u BSAM, omogućujući brz odziv i smanjenje potrošnje energije koristeći mehanizam odabira kanala. Ovaj mehanizam je implementiran pomoću dodatnog (sekundarnog) radio prijamnika koji je integriran u svaki čvor (slika 5.2)

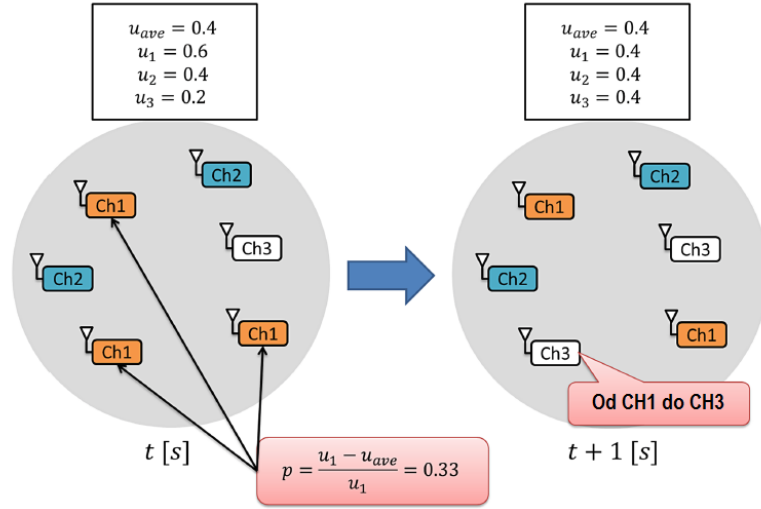


Slika 5.2. Prikaz ROD-SAN arhitekture [119]

Sekundarni prijamnik temeljen je na IEEE 802.15.4 standardu te isti radi u frekvencijskom pojasu od 920 MHz. Zbog svog dizajna njegova potrošnja energije je izrazito mala te se koristi za buđenje čvora, ali ne za slanje podatkovnih paketa. Na ovaj način ostvaruje se mala potrošnja energije čvorova tijekom perioda spavanja, te brzo buđenje i brz odziv čvorova pri potrebi uspostave komunikacije.

S druge strane, kako bi se omogućila višekanalna arhitektura u ROD-SAN autori predlažu metodu promjene kanala koja koristi podatak sekundarnog prijamnika kako bi u jednakoj mjeri raspodijelila opterećenje mreže među dostupnim kanalima. U tom cilju predložena je ACS (engl. *Average-channel-utilization based Channel Switching*) metoda temeljena na promjeni kanala u ovisnosti o mjeri korištenja kanala [120].

Prvi postupak kod ACS uključuje izračun prosječne vrijednosti mjere korištenja svih kanala, na temelju pojedinačnih mjera korištenja kanala za svaki kanal. Nakon toga ocjenjuje se koji čvorovi trebaju promijeniti kanal na temelju vjerojatnosti proizašle iz prosječne mjere korištenja kanala. U konačnici ACS smanjuje gubitak paketa i kašnjenje zbog smanjenja interferencije na kanalu postupkom učinkovite uporabe radijskog spektra. Na slici 5.3 prikazan je pregled predložene ACS metode.



Slika 5.3. Prikaz ACS metode i izračuna korištenja kanala [119]

Svaki čvor računa mjeru korištenja kanala za svaki kanal u_{ch} prije slanja podatka. Nakon izračuna u_{ch} i prosječne mjere korištenja kanala u_{ave} čvor odlučuje o promjeni kanala. Ukoliko je mjera korištenja kanala manja od $u_{ave} + \alpha$ čvor zaključuje kako je mala vjerojatnost da je kanal zagušen, stoga se ne pristupa promjeni kanala. U suprotnom, ako je mjera korištenja kanala veća od $u_{ave} + \alpha$ zaključuje se kako postoji visoka vjerojatnost da je kanal zagušen, stoga će čvor započeti s odašiljanjem podataka nakon promjene kanala. No ovaj postupak može rezultirati povećanim opterećenjem određenog kanala zbog sinkrone promjene kanala između više čvorova. Kako bi se izbjegao ovaj problem ACS metoda predlaže promjenu kanala s vjerojatnosti p . Svaki čvor periodički računa ovu vjerojatnost kao:

$$p = \frac{u_{ch} - u_{ave}}{u_{ch}} \quad (5-6)$$

Izvorišni čvor tada nasumično odabire sljedeći kanal iz popisa kanala čija je mjera korištenja kanala manja od u_{ave} , i ne odabiru kanale s velikim zagušenjem. Na ovaj način vrši se distribucija prometa i opterećenja mreže kroz dostupne kanale i samim time se smanjuje odbacivanje paketa i povećno kašnjenje.

Iako ROD-SAN arhitektura definira i ostale postupke komunikacije (pridruživanje mreže, usmjeravanje) u okviru ove disertacije korištena je samo ACS metoda promjene kanala. Isto tako, zbog činjenice da trenutna arhitektura u hibridnom modelu koordinacije nije osmišljena sa sekundarnim prijamnikom, mjera korištenja kanala je proračunata iz pristupa medija i broja uspješno i

neuspješno poslanih paketa. Tako se u okviru ove disertacije mjera korištenja kanala definira kao:

$$u_{ch} = \frac{f_i}{(s_i + f_i)} \quad (5-7)$$

gdje je s_i broj puta čvor je uspješno pristupio kanalu, a f_i broj neuspješnih pristupa kanalu (prema uzoru na CONTROL metodu). Ovim se omogućuje primjena ACS metode i u arhitekturi koja nema sekundarni prijamnik.

5.6. Zaključak poglavlja

Višekanalna arhitektura je učinkoviti način smanjenja zagušenja na bežičnom mediju korištenjem različitih frekvencijskih kanala. Princip rada temelji se na distribuciji opterećenja mreže koristeći višekanalne metode i protokole čiji je zadatak upravljanje promjenom kanala i višekanalnom komunikacijom. Za razliku od jednokanalnih mreža, u višekanalnim mrežama pojavljuju se novi problemi koji otežavaju komunikaciju. Najviše je izražen višekanalni problem skrivenog/gluhog čvora, koji nastaje kad jedan čvor pokušava slati paket drugom čvoru, a čvorovi nisu ugođeni na isti frekvencijski kanal, pri čemu dolazi do dodatnog zagušenja kanala izvorišnog čvora.

Razvoj višekanalnih protokola potican je razvojem bežičnih senzorskih mreža i potrebom za poboljšanjem njihovih performansi. Stoga se u području BSM-a pojavljuje jako velik broj višekanalnih protokola i metoda koje se mogu svrstati u tri kategorije (prema načinu dodjeljivanja kanala): statičko, dinamičko i polu-dinamičko dodjeljivanje kanala. Može se zaključiti kako protokoli iz kategorije polu-dinamičkog dodjeljivanja kanala ostvaruju najbolje značajke ostale dvije kategorije, zbog čega su i najčešće upotrebljavani protokoli. U ovoj kategoriji se najviše ističe CONTROL protokol koji koristi teoriju upravljanja s ciljem poboljšanja performansi mreže čija je metoda odabrana kao predstavnik višekanalnih metoda BSM-a.

S druge strane, postavlja se pitanje podrške višekanalnoj arhitekturi u bežičnim senzorskim i akterskim mrežama gdje se ne može izdvojiti velik broj višekanalnih protokola. Višekanalna arhitektura mreže u BSAM se najčešće temelji na čvorovima koji su opremljeni s dodatnim sklopovljem, najčešće dodatnim radijskim primopredajnicima. U tom slučaju moguće je ostvariti paralelnu komunikaciju na različitim kanalima, no postavlja se pitanje opravdanosti dodatnog troška sklopovlja. Zbog činjenice da se u okviru ove disertacije stavlja naglasak na upotrebu akterskih čvorova s jednim radijskim primopredajnikom, niti jedan protokol ne zadovoljava uvjete za primjenu u BSAM i hibridnom modelu koordinacije. No treba napomenuti da se u protokolu ROD-

SAN predlaže ACS metoda koju je moguće primijeniti i u arhitekturi bez sekundarnog prijamnika. Stoga je navedena odabrana kao predstavnik višekanalnih metoda BSAM-a.

Naposljetku, treba napomenuti kako odabrane metode imaju svoje nedostatke. Kod CONTROL metode se nazire problem brzine promjene kanala, koja može biti mala. Razlog male brzine promjene kanala jest u korištenju integralnog člana teorije upravljanja. Povećanjem integralnog koeficijenta povećava se i brzina promjene kanala, no dolazi do problema prebrze promjene kanala. Stoga ovaj problem predstavlja bitan nedostatak ove metode. Kod ACS metode pojavljuje se problem primjenjivosti same metode na BSAM bez sekundarnog prijamnika. Naime, u tom slučaju čvorovi nemaju potpunu informaciju o zagušenju u mreži te se oslanjaju na informaciju kad je čvor zadnji put koristio taj kanal. Ovdje se susreće problem zastarjele informacije o zagušenju kanala što će se odraziti na performanse metode.

Sukladno navedenom potrebno je predložiti novu metodu i protokol komunikacije koji će učinkovito obavljati promjenu kanala te ostvariti poboljšanje performansi mreže i u kritičnom slučaju zagušenja u hibridnom modelu koordinacije.

6. MEĐUSLOJNI ALGORITAM I PROTOKOL KOMUNIKACIJE ZA POBOLJŠANJE KVALITETE USLUGE U BSAM

Kako bi se smanjio problem dijeljenog medija i stvaranja zagušenja na strani krajnjeg odredišta u mreži, prijedlog unaprjeđenja postojećih protokola obuhvaća uporabu višeodredišne topologije, višekanalne arhitekture i višekanalnog algoritma s ciljem poboljšanja QoS u mreži. Ovaj prijedlog temelji se na postojećim pristupima gdje se u mrežama koristi višekanalna arhitektura mreže s ciljem poboljšanja performansi BSAM-a [117, 118]. Iako predloženi pristup već postoji kao koncept, iznimno malo radova evaluira predloženu metodu u smislu parametara kvalitete usluge u BSAM. Budući da je hibridni model koordinacije nov način koordinacije u BSAM za ovaj model potrebno je predložiti novu vrstu višekanalne arhitekture, temeljenu na višeodredišnoj topologiji mreže, gdje u mreži postoji više krajnjih odredišta podataka povezanih Internet mrežom. Na ovaj način uvodi se mogućnost balansiranja opterećenja u novo predloženoj topologiji, te se ostavlja prostor za istraživanje novog algoritma koji može ostvariti željenu razinu QoS u BSAM i hibridnom modelu koordinacije.

Prema dostupnoj literaturi, pokazano je kako upotreba višekanalne arhitekture poboljšava performanse mreže u smislu smanjenja kašnjenja te povećanja postotka primljenih paketa [117]. Razlog je distribucija opterećenja mreže među dostupnim kanalima, uvođenjem višekanalne arhitekture, čime se smanjuje zagušenje dijeljenog medija, smanjuju retransmisije na podsloju pristupu mediju te smanjuju gomilanja i odbacivanja paketa iz redova. No, ideja uporabe višekanalne arhitekture dolazi s puno nepoznanica te se postavlja primarno pitanje: Na koji način učinkovito vršiti prebacivanje kanala kako bi se za krajnji cilj dobilo poboljšanje performansi u mreži? Protokoli predloženi u literaturi (opisani u prethodnom poglavlju) rješavaju spomenuti problem kroz nekoliko perspektiva, najčešće unapređenjem podsloja pristupa mediju, no zbog prije opisanih nedostataka postojećih rješenja postavlja se pitanje njihove primjenjivosti u hibridnom modelu koordinacije.

Isto tako, treba ponovo naglasiti kako je većina predloženih metoda iz literature razvijena za područje bežičnih senzorskih mreža, dok se za područje bežičnih senzorskih i aktorskih mreža u literaturi rijetko nalaze predložena rješenja. Imajući na umu da je princip rada predloženog hibridnog modela koordinacije u suprotnosti sa idejom bežičnih senzorskih mreža (gdje je podatkovni tok orijentiran od strane senzorskog čvora prema krajnjem odredištu, a ne u suprotnom smjeru) postavlja se pitanje upotrebe postojećih rješenja u predloženom modelu koordinacije. Također,

zbog činjenice da neki od postojećih rješenja ostvaruju potpunu modifikaciju podsloja pristupa mediju ili modifikaciju fizičkog sloja, primjena spomenutih metoda nije moguća u predloženom ispitnom okruženju BSAM-a. Tu se primarno svrstavaju rješenja s više primopredajnika, rješenja sa modifikacijom vremenskog okvira i rješenja sa heterogenim prijemnicima. Zbog spomenutog pristupilo se razvoju višekanalne metode koji koristi postojeće rješenje sloja za pristup mediju (CSMA/CA) te koncept međuslojne optimizacije tj. poprečnog dizajna slojeva (engl. *cross-layer*).

Primarna ideja predložene metode ima za cilj pojednostavljenje kompliciranih postupaka postojećih rješenja, uz uvođenje estimatora vjerojatnosti promjene kanala. U tom slučaju, promjena kanala vrši se stohastički sa estimiranom vjerojatnosti promjene kanala, na temelju uspješnosti komunikacije.

6.1. Prijedlog inicijalnog CLMC algoritma

Prema opisu protokola LightWeigh Mesh (LWM), koji je odabran kao osnovni protokol za poboljšanje QoS u u hibridnom modelu koordinacije, postoje četiri sloja protokolnog stoga: fizički sloj, podsloj pristupu mediju, mrežni sloj i aplikacijski sloj. Treba napomenuti da su donja dva sloja (fizički sloj i podsloj pristupu mediju) predstavljena kao sklopovsko rješenje u obliku integriranog kruga AT86RF231, stoga modifikacije ova dva sloja nisu moguće. Pri slanju paketa s aplikacijskog sloja, svaki sloj protokola dodaje svoje zaglavlje te sprema informaciju o uspješnosti slanja paketa sa sloja na sloj. Tako gledajući od najnižeg sloja prema najvišem, dostupne su sljedeće informacije o poslanom paketu:

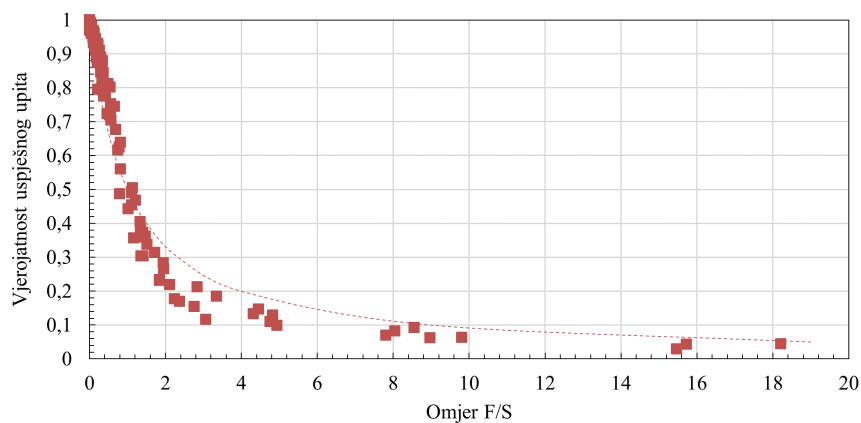
- *Fizički sloj* - da li je sloj uspješno pristupio dijeljenom mediju (kanalu) ili je kanal zauzet - CCA (engl. *Clear Channel Assessment*),
- *Podsloj pristupu mediju* - da li je primljena potvrda primitka paketa na sljedećem skoku - MAC ACK (engl. *ACKnowledge*) i
- *Mrežni sloj* - da li je primljena potvrda primitka paketa na krajnjem odredištu (NWK ACK)

Nakon što paket prođe sve slojeve (od aplikacijskog do fizičkog sloja) CCA algoritam provjerava da li je kanal slobodan te može li započeti transmisija podataka prema sljedećem čvoru, na fizičkom sloju. Ukoliko je kanal slobodan započinje se s izvođenjem CSMA/CA algoritma. Završetkom algoritma dobiva se informacija da li je paket uspješno proslijeđen sljedećem čvoru. Ako je paket uspješno proslijeđen sljedećem čvoru, mrežni sloj čeka potvrdu o uspješnom slanju paketa na krajnje odredište u mreži, što se potvrđuje ACK paketom na mrežnom sloju. Ako je čvor primio mrežni ACK paket može se zaključiti da je paket uspješno proslijeđen na krajnje odredište.

U slučaju hibridnog modela koordinacije ovaj postupak predstavlja polovicu tijeka komunikacije, jer odaslati paket predstavlja upit na koji je potrebno dobiti odgovor. Stoga, potvrda da je paket (upit) uspješno proslijeđen krajnjem odredištu ne znači nužno da će odgovor na upit biti uspješno vraćen čvoru. Kako bi se provjerila navedena tvrdnja napravljeno je mjerenje komunikacije u hibridnom modelu koordinacije gdje je izražena vjerojatnost uspješnog upita, u odnosu na omjer uspješnih/neuspješnih potvrda odaslanog paketa (upita). Omjer se definira kao:

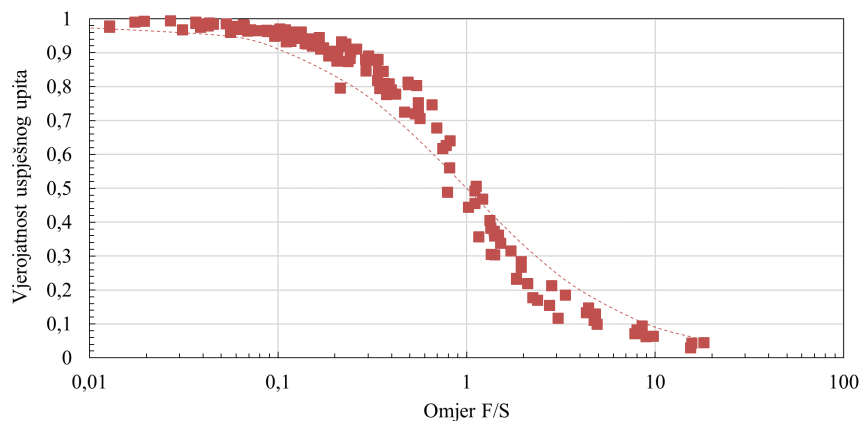
$$F/S = \frac{N_{neusp}}{N_{uspj}} \quad (6-1)$$

gdje je N_{uspj} broj uspješno odaslanih paketa (upita) a N_{neusp} broj neuspješno odaslanih paketa (upita). Svaka točka na dijagramu predstavlja vjerojatnost slanja 100 upita (paketa), računanjem odnosa F/S za broj uspješno odaslanih i neuspješno odaslanih paketa. Različite točke na dijagramu odgovaraju kombinacijama parametara T_{max} i N kako bi se ispitalo ponašanje parametra F/S u raznim uvjetima i zagušenjima mreže. Izgled dijagrama prikazan je na slici 6.1.



Slika 6.1. Ovisnost vjerojatnosti uspješnog upita o omjeru neuspješne i uspješne potvrde paketa; linearno mjerilo

Iz dijagrama se može zaključiti kako postoji značajna veza između vjerojatnosti uspješnog upita te omjera F/S na strani čvora koji šalje upit (crtkastom linijom izjednačena je vjerojatnost uspješno odaslanog upita s ukupnom vjerojatnošću uspješnog upita). U slučaju da je vjerojatnost uspješno odaslanog upita 1 ($F/S = 0$), ukupna vjerojatnost uspješnog upita je također 1. Povećanjem omjera F/S (povećanjem broja informacija o neuspjelom slanju upita) smanjuje se i ukupna vjerojatnost uspješnog upita. Ukoliko se omjer F/S prikaže u logaritamskom mjerilu dobije se pravilna ovisnost ukupne vjerojatnosti uspješnog upita u ovisnosti o omjeru F/S (slika 6.2).



Slika 6.2. Ovisnost vjerojatnosti uspješnog upita o omjeru neuspješne i uspješne potvrde paketa; logaritamsko mjerilo

Dobivenim odnosom može se zaključiti kako je vjerojatnost uspješno odaslanog upita u izravnoj vezi s ukupnom vjerojatnošću uspješnog upita. Stoga, budući da svaki čvor u mreži može izračunati odnos F/S pomoću prije opisane informacije sa svakoj sloja protokola, iz spomenutog odnosa moguće je procijeniti ukupnu vjerojatnost uspješnog upita u mreži, i samim time predvidjeti trenutnu kvalitetu usluge u mreži.

No, postavlja se sljedeće pitanje: Koliko uzoraka odnosa F/S je potrebno prikupiti, tj. nakon koliko odaslanih paketa se može ocijeniti vrijednost F/S ? Broj uzoraka za procjenu naziva se veličina prozora. Ukoliko je veličina prozora mala, pogreška procjene F/S je velika, dok se većom veličinom prozora stvara kašnjenje, čime procjena zagušenja u mreži može biti zastarjela.

Jedna od najčešće primijenjenih metoda za procjenu parametara je *Moving Average* (MA) metoda i njezine inačice. MA metoda uzima u obzir srednju vrijednost prikupljenu od niza uzoraka, unutar promatranog prozora. Ako je D_n n -ti uzorak, njegova procjena može se izraziti kao [124]:

$$\widehat{D}_n = D_{n-1} \quad (6-2)$$

gdje se $\widehat{D}_n$ koristeći MA metodu dobiva kao [124]:

$$\widehat{D}_n = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} D_{n-1-i} \quad (6-3)$$

gdje je N broj prethodnih uzoraka unutar promatranog prozora.

S druge strane, MA metodu je jednostavno implementirati tijekom analize, no nije prikladna za implementaciju u samom sklopovlju (mikroupravljaču), zbog povećane potražnje za memorijom.

S druge strane, jedna od inačica MA metode je EWMA (engl. *Exponential Weighted Moving*

Average) metoda, koja se temelji na eksponencijalnim težinskim faktorima, što rezultira time da se u procjeni parametara nalaze svi uzorci koji su ikad uzeti, sa smanjenom težinom što je podatak stariji [124]:

$$\widehat{D}_n = \beta \cdot D_{n-1} + (1 - \beta) \cdot \widehat{D}_{n-1} \quad (6-4)$$

gdje je β faktor usrednjavanja $\langle 0,1 \rangle$.

Ova metoda jako je zastupljena u području bežičnih mreža i uspješno je implementirana u raznim primjenama. Autori u [125] predlažu adaptivnu shemu temeljenu na EWMA kako bi ostvarili BSAM otporan na kvarove te balansirali promet koristeći višestazno usmjeravanje. U [126] autori predlažu mehanizam nadzora kvalitete linka gdje se EWMA koristi za usrednjavanje rezultata. Autori u [127] predlažu algoritam predviđanja temeljen na MA metodi za korištenje u BSM sa solarnim napajanjem, te uspoređuju rezultate s EWMA metodom. U [128] autori predlažu metodu procjene kvalitete linka koja koristi EWMA metodu za ugađanje osjetljivosti. Nadalje, autori u [129] predlažu model za procjenu potrebne energije za bežične senzorske čvorove, te uspoređuju sa EWMA rješenjima. U [130] autori predlažu upotrebu metrike usmjeravanja temeljenu na prosječnom kašnjenju međuspremnik i slanja koristeći EWMA. Naposljetku, autori u [131] koriste mehanizam agregacije podataka kako bi smanjili broj nepotrebnih paketa uzimajući u obzir podatke dobivene pomoću EWMA metode.

Iz priloženog može se zaključiti kao je EWMA metoda vrlo zastupljena i često korištena u području bežičnih mreža. Primarni razlog je jednostavnost implementacije te malo zauzeće memorije. Zbog činjenice da EWMA koristi eksponencijalno usrednjavanje vrijednosti i uzima sve prikupljene uzorke u obzir s ciljem predviđanja vrijednosti parametara, moguće je koristiti EWMA metodu s ciljem procjene vrijednosti F/S .

Ukoliko se omjer F/S razmatra iz perspektive zagušenja komunikacijskog kanala, tada se može reći da odnos F/S definira zagušenost komunikacijskog kanala na način da što je vrijednost parametra F/S veća, vjerojatnost da je kanal zagušen je veća. Sukladno navedenom moguće je definirati klasifikator vjerojatnosti zagušenja kanala na temelju jednog uzorka, koja iznosi:

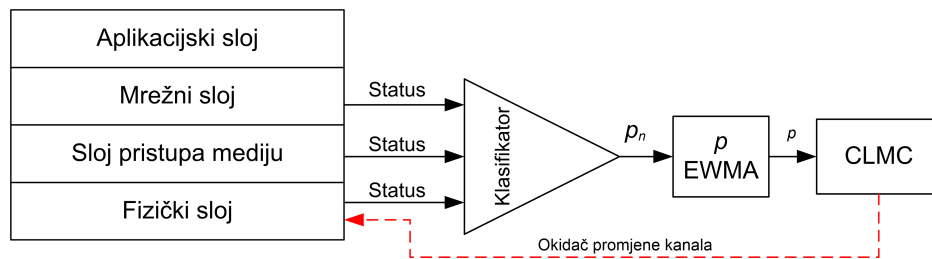
$$p_n = \begin{cases} 0 & , \text{ za uspješno odaslani upit} \\ 1 & , \text{ za neuspješno odaslani upit} \end{cases} \quad (6-5)$$

Iz predloženog klasifikatora vjerojatnosti zagušenja kanala uviđa se da je za samo jedan uzorak

nemoguće procijeniti zagušenost kanala, jer je vjerojatnost predstavljena binarno. S druge strane, primjenom EWMA estimatora moguće je dobiti procjenu vjerojatnosti zagušenja kanala na temelju više uzoraka. U ovom slučaju, sve vjerojatnosti (za svaki upit) se kroz EWMA estimator uzimaju u obzir, s ciljem predviđanja vjerojatnosti zagušenja kanala za sljedeći uzorak (upit). Kako je cilj svih višekanalnih protokola distribucija prometa među zadanim kanalima, informacija o zagušenosti trenutnog kanala iznimno je važna. Procijenjena vjerojatnost zagušenja kanala p izvedena je pomoću jednadžbe (6-3) za EWMA metodu i predložena je kao:

$$p = \hat{p}_n = \beta \cdot p_{n-1} + (1 - \beta) \cdot \widehat{p_{n-1}} \quad (6-6)$$

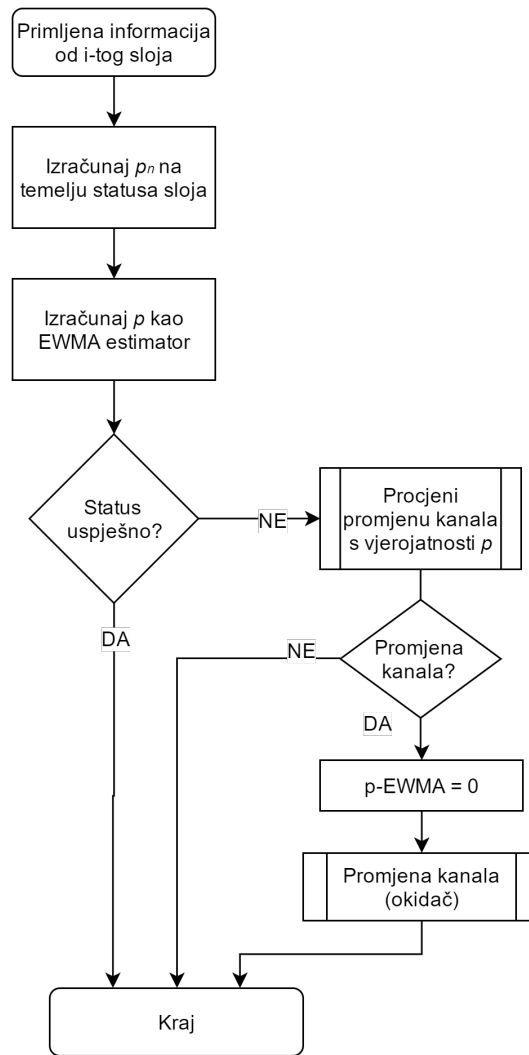
Kako bi predložena metoda mogla koristiti dobivene informacije od različitih slojeva protokolnog stoga, predložena je međuslojna tj. poprečna (engl. *Cross-Layer*) metoda nazvana CLMC (engl. *Cross-Layer Multi Channel*). Blok dijagram metode u svezi s protokolnim stogovima prikazan je na slici 6.3.



Slika 6.3. Blok dijagram predložene CLMC metode

Kako bi se dobivena vjerojatnost zagušenja kanala mogla iskoristiti s ciljem detekcije zagušenja, predložen je algoritam koji koristi procijenjenu vjerojatnost zagušenja kanala kao vjerojatnost promjene kanala. Princip rada algoritma prikazan je na slici 6.4.

Nakon što se od i -tog sloja primi informacija o statusu odaslanog paketa (opisano prije), informacija se šalje u klasifikatoru gdje se računa vjerojatnosti zagušenja prema jednadžbi (6-5). Nakon izračuna vjerojatnosti p_n pristupa se procjeni vjerojatnosti zagušenja kanala koristeći EWMA metodu (6-6), pri čemu se dobiva vjerojatnost zagušenja kanala p . Nakon dobivene vjerojatnosti zagušenja kanala pokreće se CLMC algoritam. Algoritam provjerava da li je paket (upit) uspješno poslan prema krajnjem odredištu. Ako je paket uspješno poslan do krajnjeg odredišta algoritam završava i ne pristupa se mogućoj promjeni kanala. Ukoliko paket (upit) nije uspješno dostavljen do krajnjeg odredišta (medij nije slobodan, ACK nije primljen) algoritam započinje s procesom promjene kanala, uvjetovan procijenjenom vjerojatnošću p iz EWMA metode. Proces promjene kanala će izvršiti promjenu kanala s vjerojatnošću p , uzimajući u obzir stohastičku prirodu pro-



Slika 6.4. Dijagram toka predloženog međuslojnog algoritma - CLMC

mjene. Ukoliko je nakon izvršenog procesa promjene kanal c ostao jednak kao i prije, algoritam završava s radom. Ukoliko se nakon izvršenog procesa kanal promijenio (vjerojatnost p je bila dovoljno velika da se izvrši promjena $c = c + 1$) trenutna vrijednost EWMA estimatora će se poništiti na nulu i započinje ponovni postupak procjene vjerojatnosti zagušenja kanala $c + 1$.

Na temelju opisanog algoritma, promjena kanala se događa sve dok je trenutni kanal dovoljno zagušen te postoji potreba prelaska na sljedeći kanal. Nakon što dovoljno čvorova izvrši promjenu kanala, ukupno zagušenje mreže će se distribuirati na dostupne kanale, što će rezultirati povećanjem vjerojatnosti uspješnog upita u mreži te smanjenjem vremena odziva.

6.2. Vrednovanje predloženog CLMC algoritma metodom simulacije

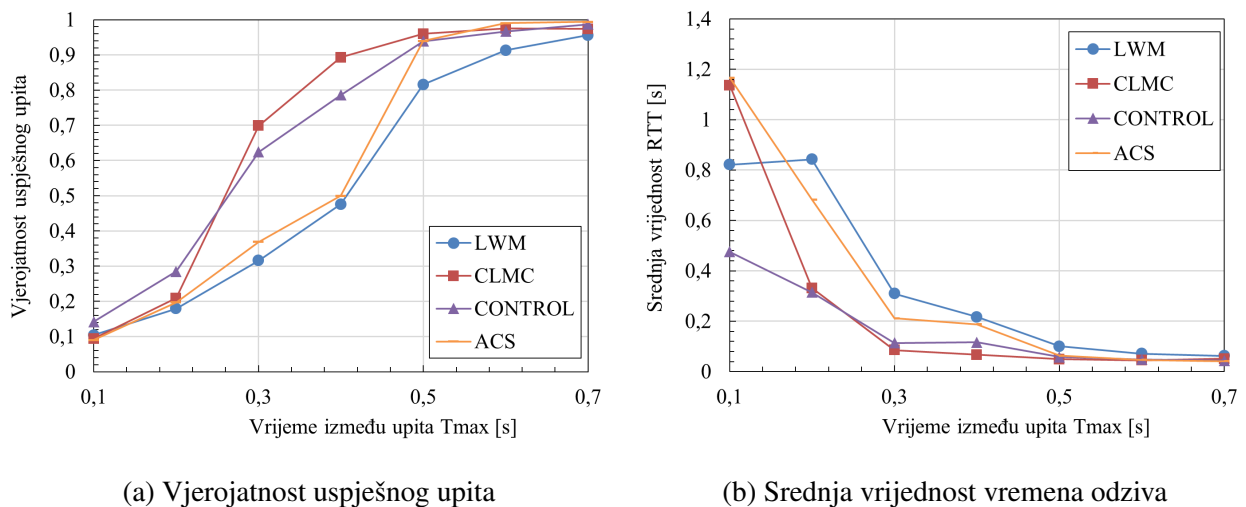
Na temelju prije odabranoga LWM protokola kao očitog kandidata za uporabu u BSAM, na isti je primijenjena CLMC metoda s ciljem analize mogućnosti poboljšanja mrežnih performansi i QoS

u cijelosti. Ovo združivanje CLMC metode i LWM protokola rezultira novim CLMC protokolom. Na isti LWM protokol primijenjena su i prije dva odabrana algoritma iz literature (CONTROL i ACS) u cilju analize performansi. Simulacija je napravljena u simulacijskom alatu OMNeT++, prema parametrima detaljno opisanim u poglavlju 4.4.

Mreža se sastoji od ukupno M čvorova, gdje su N čvorova aktivni čvorovi (čvorovi koji šalju upite). Čvorovi su nasumično postavljeni unutar promatranog područja od 100m x 100m gdje je domet čvora veći nego dijagonala područja. U ovom scenariju komunikacija je s jednim skokom (bez usmjeravanja). U mreži je prisutno C krajnjih odredišta i isto toliko komunikacijskih kanala je dodijeljeno. Svako krajnje odredište u mreži je postavljeno na drugi frekvencijski kanal. Krajnja odredišta u mreži ne mijenjaju kanale. Korištene metrike kvalitete usluge definirane su u poglavlju 4 (vjerojatnost uspješnog upita, srednje i maksimalno vrijeme odziva). Simulacija je provedena za 100 uzastopnih upita generiranih od svakog čvora u mreži, prema krajnjem odredištu, u definiranom načinu rada hibridnog modela koordinacije. Simuliran je kritični scenarij u kojem svi čvorovi u mreži kontinuirano šalju upite prema krajnjem odredištu u mreži.

Vrednovanje performansi algoritma izvršeno je postupkom simulacije u mreži s dva krajnja odredišta (tj. dva kanala ($C = 2$), N aktivnih čvorova (čvorovi koji šalju upite) te različitim intenzitetima generiranja upita od strane čvora (vrijednosti T_{max}). Simulirana konfiguracija mreže je postavljena na jedan skok (bez usmjeravanja). Svaka točka na dijagramu dobivena je kao srednja vrijednost 5 pokusa.

Rezultati simulacije CLMC algoritma za mrežu od $N = 10$ čvorova, u usporedbi s prije odabranim CONTROL i ACS algoritmima, prikazani su na slici 6.5.



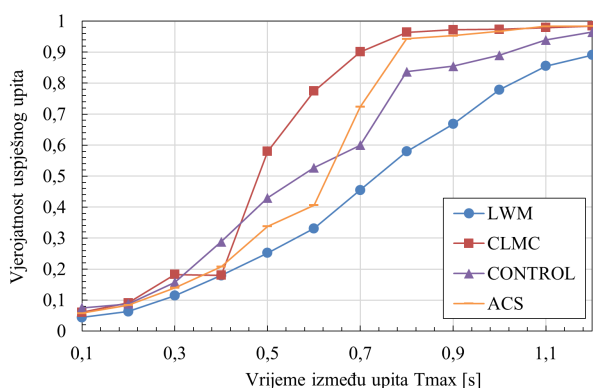
Slika 6.5. Dijagram metrika kvalitete usluge u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} , za $N = 10$ aktivnih čvorova i $C = 2$ krajnja odredišta/kanala

Cilj predloženog algoritma i implementiranog protokola je povećanje vjerojatnosti uspješnog upita i smanjenje vremena odziva, rezultat čega je poboljšanje kvalitete usluge u mreži. Ukoliko se usporede rezultati na slici 6.5a, oznakom LWM označen je inicijalni LWM protokol bez implementiranih višekanalnih metoda (jednokanalni scenarij). Na spomenuti protokol implementirane su metode iz literature (CONTROL, ACS) te predložena CLMC metoda. Slika 6.5a prikazuje vjerojatnost uspješnog upita u mreži za mrežu od 10 aktivnih čvorova, za različite vrijednosti maksimalnog vremena između uzastopnih upita (definirano uniformnom razdiobom, vidi poglavlje 4.2).

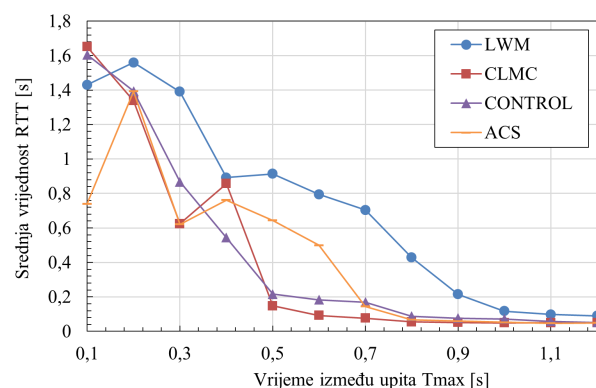
Iz dijagrama vjerojatnosti uspješnog upita za 10 aktivnih čvorova vidljivo je kako metode iz literature CONTROL i ACS rezultiraju poboljšanjem kvalitete usluge osnovne jednokanalne mreže za različite vrijednosti T_{max} , što je i očekivano. Najveće poboljšanje ostvaruje CONTROL metoda, dok ACS metoda ostvaruje neznatno poboljšanje vjerojatnosti uspješnog upita. S druge strane, predložena CLMC metoda dodatno poboljšava kvalitetu usluge u uvjetima kada mreža nije jako zagušena (vrijednosti $T_{max} < 0,3$ s). U slučaju velikog zagušenja u mreži predložena CLMC metoda ne ostvaruje poboljšanje kao CONTROL metoda.

Ukoliko se isto promatra sa stajališta srednje vrijednosti vremena odziva (slika 6.5b) vidljivo je kako CONTROL metoda ostvaruje najmanje vrijeme odziva za promatrano vrijeme T_{max} , dok predložena CLMC metoda prati CONTROL metodu sve do područja većeg zagušenja (u ovom slučaju $T_{max} < 0,3$ s), nakon čega se vrijeme odziva povećava na iznos veći i od temeljnog LWM protokola (bez višekanalnih metoda).

Nadalje, isti postupak simulacije primijenjen je na mrežu s $N = 20$ aktivnih čvorova te su rezultati simulacije prikazani na slici 6.6.



(a) Vjerojatnost uspješnog upita



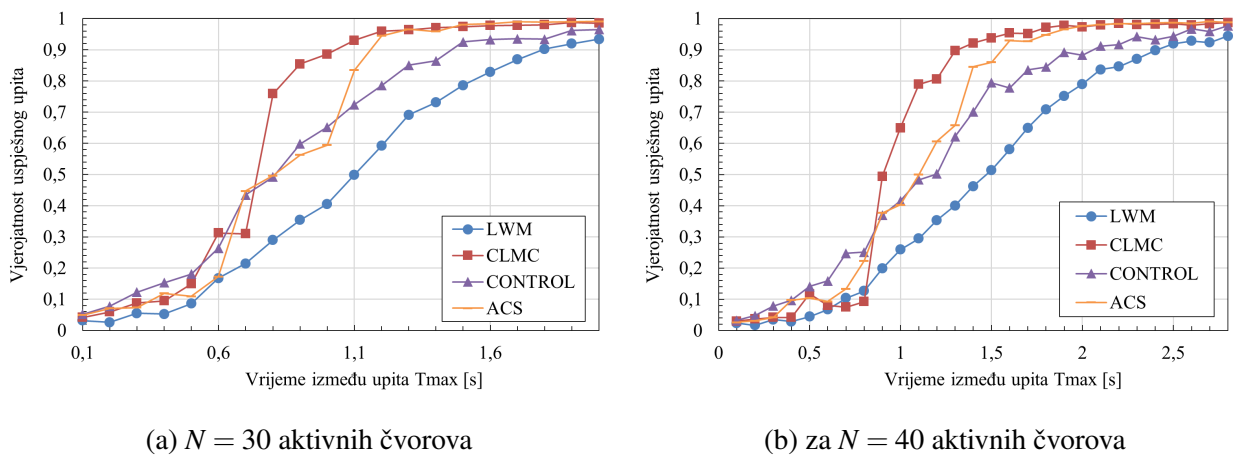
(b) Srednja vrijednost vremena odziva

Slika 6.6. Dijagram metrika kvalitete usluge u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} , za $N = 20$ aktivnih čvorova i $C = 2$ krajnja odredišta/kanala

Prema slici 6.6a prikazan je scenarij s 20 aktivnih čvorova s obzirom na vjerojatnost uspješnog upita. Kao i u scenariju s 10 aktivnih čvorova može se vidjeti kako predložena CLMC metoda ostvaruje značajno poboljšanje performansi izvan područja većeg zagušenja (u ovom slučaju $T_{max} < 0,5$ s). U području većeg zagušenja predloženi protokol ne ostvaruje značajno poboljšanje kvalitete usluge te u tom pogledu CONTROL ostvaruje bolje performanse.

Nadalje, ukoliko se promatra vrijeme odziva mreže (slika 6.6b) može se zaključiti kako povećanjem broja aktivnih čvorova u mreži predložena CLMC metoda ostvaruje bolje performanse, u okviru vremena odziva te ostvaruje neznatne razlike u usporedbi s CONTROL metodom. Sve analizirane metode ostvaruju smanjenje vremena odziva u usporedbi s osnovnim LWM protokolom i jednokanalnom arhitekturom.

Ukoliko se broj aktivnih čvorova u mreži dalje povećava mogu se uočiti opisani nedostaci predloženog protokola CLMC, obzirom na zagušenje mreže (slika 6.7)



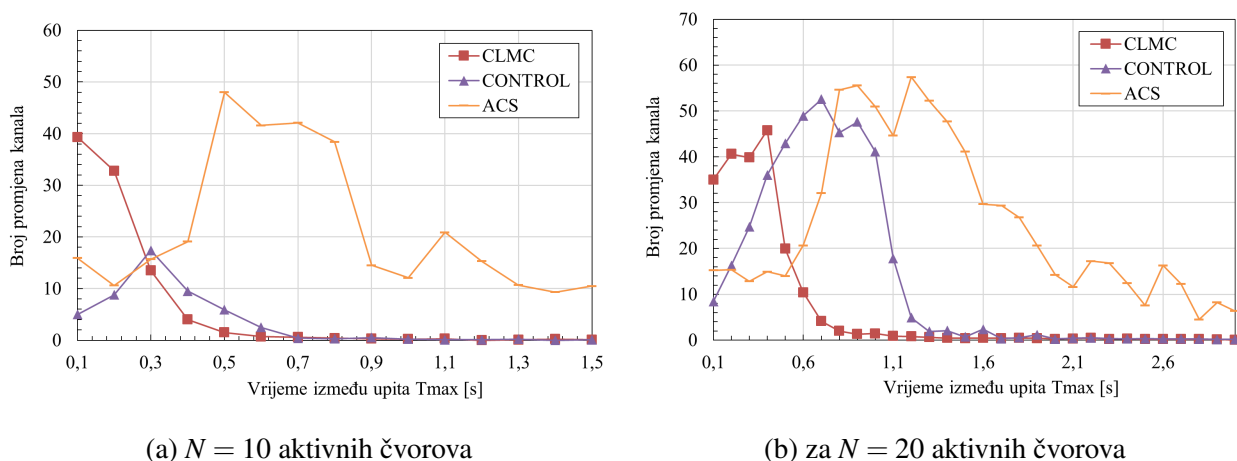
Slika 6.7. Vjerojatnost uspješnog upita u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} , za $C = 2$ krajnja odredišta/kanala

Prema slici 6.7a za scenarij sa 30 aktivnih čvorova pojavljuju je isti nedostaci spomenutog protokola za područje većeg zagušenja (u ovom slučaju $T_{max} < 0,8$ s) gdje se performanse predložene CLMC metode naglo degradiraju i ponekad spuštaju ispod razine metoda iz literature (CONTROL i ACS). Ovo je vidljivo i za slučaj sa 40 aktivnih čvorova (slika 6.7b) pri čemu dolazi do značajne degradacije performansi u području jakog zagušenja.

S druge strane, vidljivo je da u području manjeg zagušenja predloženi CLMC protokol ostvaruje značajno poboljšanje performansi u usporedbi s postojećim metodama. Tako za vrijednost $T_{max} = 1$ s predloženi CLMC algoritam ostvaruje poboljšanje vjerojatnosti vremena odziva za 26,5 % u odnosu na CONTROL metodu, 32,8 % u odnosu na ACS metodu te 54,2 % u odnosu na osnovni jednokanalni protokol LWM.

Kako bi se detaljno moglo analizirati učinkovitost višekanalne metode, jedan od načina vrednovanja i usporedbe istih je broj promjena kanala tijekom eksperimenta. Kako bi se očuvala energetska učinkovitost i smanjila kontaminacija RF spektra krajnji cilj je minimizirati broj promjena kanala neke metode.

Za predloženu CLMC metodu i ostale metode iz literature postupkom simulacije određen je broj promjena kanala u scenarijima s 10 i 20 aktivnih čvorova. Rezultati su prikazani na slici 6.8.



Slika 6.8. Broj promjena kanala u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} , za $C = 2$ krajnja odredišta/kanala

Prema dijagramu na slici 6.8a vidljivo je da broj promjena kanala ovisi o vremenu između uzastopnih upita (T_{max}), različito za svaku metodu. Samim time može se zaključiti da broj promjena kanala ovisi o zagušenju u samoj mreži, gdje predložene metode promjenom kanala nastoje smanjiti zagušenje na trenutnom kanalu. Za metodu CONTROL može se zaključiti kako prosječno ostvaruje najmanji broj promjena kanala, pogotovo u uvjetima većeg zagušenja (u ovom slučaju $T_{max} < 0,3$ s). Tu se i vidi njezina prednost u usporedbi s predloženom CLMC metodom. Nadalje, ACS metoda se odlikuje velikim brojem promjena kanala u slučaju manjeg zagušenja mreže, čime se nepotrebno troše resursi same mreže i povećava mogućnost gubitka paketa zbog višekanalnog problema gluhog čvora.

Naposljetku, predložena CLMC metoda ostvaruje manji broj promjena kanala nego ACS metoda, u slučaju kad mreža nije u području većeg zagušenja. Ovim se ostvaruju bolje performanse te samim time bolja kvaliteta usluge. No, s druge strane, iz dijagrama je očito kako predložena CLMC metoda ostvaruje jako velik broj promjena kanala u slučaju većeg zagušenja mreže (u ovom slučaju $T_{max} < 0,3$ s) što ima za rezultat smanjene performanse metode i smanjenje kvalitete usluge u mreži. Slične performanse svih metoda vidljive su i za slučaj sa 20 aktivnih čvorova (slika 6.8b). Razlog je sličan kao i kod ACS metode, a to je problem gluhog čvora u višekanalnoj

komunikaciji. Naime, ako je broj promjena kanala u jedinici vremena velik, čvor ne stigne primiti potrebnu informaciju koja je poslana na trenutnom kanalu jer je radio prijemnik u trenutku slanja informacije već promijenio kanal.

Rješenja ovih problema iziskuju koordinaciju čvorova, usmjerivača i krajnjih odredišta u mreži kako bi se čvorovi informirali o stanju u mreži. No, ovakvi pristupi iziskuju generiranje dodatnog kontrolnog prometa koji će nadalje smanjiti performanse mreže u slučaju većeg zagušenja mreže. Također, spomenuti pristupi često su centralizirani što dovodi do neučinkovitosti mreže i SPOF problemu (engl. *Single Point Of Failure*). U cilju rješavanja ovih nedostataka predloženog CLMC protokola u ovoj disertaciji stavlja se naglasak na decentraliziranom rješenju koje ne rezultira povećanjem kontrolnog prometa i ostvaruje autonomnost mreže i u slučajevima kvara segmenta mreže.

6.3. Prijedlog poboljšanja CLMC protokola prilagođenog za BSAM i hibridni model koordinacije: H-CLMC protokol

Prema saznanjima iz prethodnog poglavlja te vrednovanjem predložene inicijalne metode za poboljšanje kvalitete usluge u bežičnim senzorskim i aktorskim mrežama (CLMC), zaključeno je kako predložena višekanalna CLMC metoda ostvaruje povećanje kvalitete usluge u scenariju kada mreža nije jače opterećena, dok u području većeg zagušenja mreže javlja se degradacija performansi. Razlog tome jest činjenica da predložena CLMC metoda u području većeg zagušenja mreže ostvaruje veći broj promjena kanala, pri čemu se događa višekanalni problem gluhog čvora, rezultat čega je gubitak paketa.

Kako bi se ostvarili pozitivni učinci spomenutog protokola, promjena kanala mora biti uvjetovana stanjem u mreži, a ne čvrstim smanjenjem broja promjena kanala (ovdje se primarno misli na koeficijent β EWMA metode procjene vjerojatnosti zagušenja kanala, jednadžba 6-6). Naime, promjenom iznosa spomenutog koeficijenta moguće je smanjiti odziv samog estimatora, što bi rezultiralo manjom vrijednošću procijenjene vjerojatnosti, a samim time i manjim brojem promjena kanala. No, problem u tom slučaju predstavlja spori odziv predložene metode, jer je potreban veliki broj odaslanih paketa kako bi se procijenilo zagušenje mreže/trenutnog kanala.

Dodavanjem nekoliko stupnjeva u postojeću metodu smanjuje se spomenuti problem, s ciljem postizanja optimalne brzine promjene kanala. Kako bi se sačuvao odziv CLMC metode, a ograničio nepotrebno velik broj promjena kanala (u uvjetima većeg zagušenja mreže), u okviru ove disertacije predlaže se poboljšanje CLMC metode što rezultira novim višekanalnim međuslojnim protokolom primijenjenim na hibridni model koordinacije: H-CLMC.

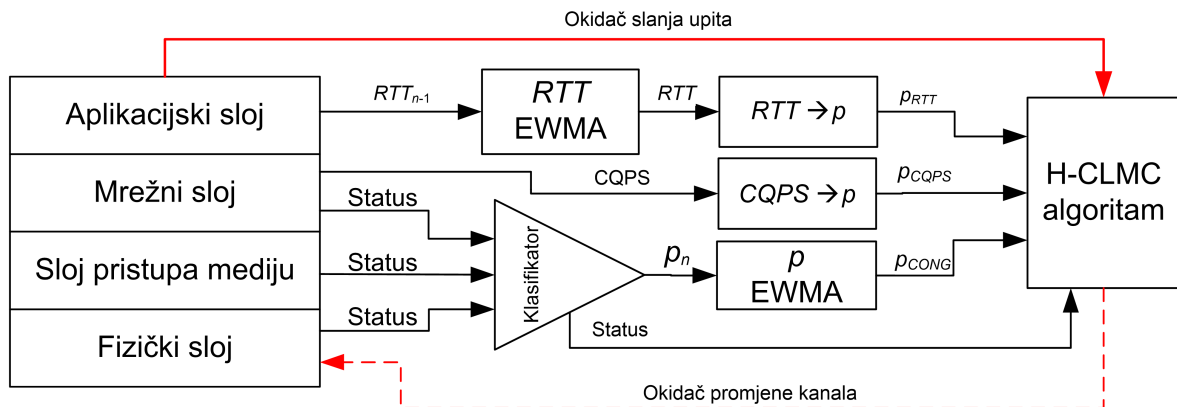
Poboljšanja H-CLMC metode u usporedbi s CLMC metodom su:

1. **Uvođenje vremenskog ograničenja promjene kanala kao funkcije vjerojatnosti procijenjenoga vremena odziva** - primarni problem koji je uočen u CLMC metodi je preveliki broj promjena kanala, koji rezultira degradacijom performansi mreže zbog višekanalnog problema gluhog čvora. Ovim pristupom čvorovi procjenjuju koliko vremena je potrebno da se na odaslani upit primi odgovor te tijekom tog vremena zadržavaju trenutni kanal. Predloženim poboljšanjem smanjuje se višekanalni problem gluhog čvora i poboljšavaju performanse u mreži.
2. **Proširenje klasifikatora statusa i EWMA estimatora** - postojeći klasifikator koji je predložen kod CLMC metode iskorišten je i u H-CLMC metodi te predstavlja osnovu cijele

metode. Razlika prema CLMC metodei uključuje stvaranje tablice svih kanala koje čvor koristi, čime se omogućuje pregled zagušenja svih kanala na kojima je čvor komunicirao.

3. **Dohvaćanje CQPS podatka krajnjeg odredišta u mreži** - prijedlog obuhvaća modifikaciju mrežnog sloja osnovnog LWM protokola na način da se u okvir paketa potvrde na mrežnom sloju (ACK) integrira podatak o CQPS vrijednosti mreže. Ovaj podatak kontinuirano računu krajnja odredišta u mreži te tijekom primanja upita prosljeđuju trenutnu informaciju o zagušenju mreže prema čvorovima. Ovom metodom čvorovi u mreži dobivaju točan podatak o zagušenosti mreže na temelju CQPS dijagrama krajnjeg odredišta u mreži te mogu procijeniti vjerojatnost promjene kanala. U tom pogledu koristi se modificirani pristup ACS metode koja procjenjuje vjerojatnost promjene kanala na temelju srednje vrijednosti svih kanala u mreži - o ovom slučaju srednje vrijednosti CQPS informacije.
4. **Unaprjeđenje algoritma procjene promjene kanala** - prijedlog obuhvaća proširenje inicijalnog algoritma na način da isti obuhvaća gore navedena poboljšanja te koristi dobivene informacije s ciljem učinkovite promjene kanala.

Navedenim unaprjeđenjima CLMC metode predložena je H-CLMC metoda i algoritam promjene kanala. Blok dijagram predloženog rješenja prikazan je na slici 6.9.



Slika 6.9. Blok dijagram predloženog rješenja H-CLMC protokola

Iz prikazanoga blok dijagrama vidljive su interakcije između slojeva koje čine ovu metodu i algoritam međuslojnim pristupom tj. poprečnim dizajnom slojeva (engl. *cross-layer*). Detaljan opis H-CLMC metode slijedit će taksativno nabrojana poboljšanja te će naposljetku biti opisana cjelovita funkcionalnost predložene metode, koja će integracijom sa LWM stogom činiti protokol komunikacije.

6.3.1. Uvođenje vremenskog ograničenja promjene kanala i procjena vremena odziva (EWMA metoda)

Jedan od primarnih problema koji se susreću u višekanalnoj komunikaciji je višekanalni problem skrivenog čvora [100]. Spomenuti problem nastaje kada čvor pokušava poslati poruku susjednom čvoru, a oba nisu ugođena na isti frekvencijski kanal. U tom slučaju ne postoji komunikacija između čvorova te odaslani paketi ne dolaze do odredišta.

Specifična situacija koja se pojavljuje u predloženom hibridnom modelu koordinacije blisko je vezana višekanalnom problemu skrivenog čvora: čvor priprema upit na koji želi dobiti odgovor od udaljenog poslužitelja te isti prosljeđuje kroz BSAM prema krajnjem odredištu, na trenutnom kanalu. Propagacija upita vrši se na istom kanalu na kojem je komunikacija i započela te krajnje odredište u mreži odgovara na upit također na istom kanalu (zbog činjenice da krajnja odredišta u mreži koriste fiksni frekvencijski kanal). Odgovor na upit se propagira kroz mrežu te stiže do čvora koji je inicirao upit. Ukoliko se tijekom očekivanja odgovora na upit čvor promjeni kanal (npr. zbog zagušenja u mreži), odaslani upit na početnom kanalu neće stići do odredišta jer su čvorovi zadnjeg skoka na različitim frekvencijskim kanalima (višekanalni problem skrivenog čvora).

Kako bi se ovaj problem izbjegao potrebno je predložiti metodu koja uzima u obzir hibridni model koordinacije i način razmjene informacija u mreži te na taj način smanjuje spomenuti problem skrivenog čvora. Jedan od načina je implementacija ograničenja promjene kanala sve dok čvor ne primi odgovor na upit.

Ovaj prijedlog ima osnove za poboljšanje performansi u mreži jer će onemogućiti promjenu kanala ako je u tijeku slanje upita u mreži čime će se izbjeći višekanalni problem skrivenog čvora. No, problem nastaje prilikom većeg zagušenja u mreži kada je moguće da se odgovor na upit neće primiti (ili će se primiti s velikim kašnjenjem). Zbog spomenutoga nije moguće uvesti čvrsti uvjet promjene kanala u ovisnosti o primitku odgovora nego taj uvjet se mora prilagođavati uvjetima u mreži.

Jednostavan princip sprječavanja promjene kanala je uvođenje vremenskog ograničenja promjene kanala od posljednje promjene, gdje se definira vremenski interval tijekom kojeg se kanal ne smije promijeniti. U tom slučaju postavlja se pitanje veličine vremenskog intervala nakon kojeg čvor može promijeniti kanal? Veća vrijednost vremenskog intervala značiti će manji broj promjena kanala što za prednost ima smanjenje višekanalnog problema skrivenog čvora, no s druge strane uvodi tromost u proces promjene kanala i povećava zagušenje na kanalu.

Ukoliko se ponovo sagleda princip komunikacije u hibridnom modelu koordinacije može se

uočiti kako je inicijalni prijedlog zabrane promjene kanala u trajanju dok čvor očekuje odgovor na upit ispravan pristup, no umjesto uvođenja čvrstog uvjeta promjene potrebno je uvesti uvjet vezan za vrijeme potrebno da se dobije odgovor na upit - vrijeme odziva (RTT).

Kako svaki čvor može odrediti potrebno vrijeme odziva na način da mjeri vrijeme potrebno da se dobije odgovor na upit, moguće je uvesti procjenu vremena odziva za sljedeći upit koji će čvor poslati. Na temelju procijenjenog vremena odziva $\widehat{RTT}$ predložena je metoda ograničenja promjene kanala. Kako prolazi vrijeme od zadnje promjene kanala, povećava se vjerojatnost promjene kanala. U ovom slučaju svaki čvor za sebe određuje vrijeme odziva i nema potrebu za slanjem dodatnog kontrolnog prometa prema ostalim čvorovima niti krajnjem odredištu, što predstavlja decentraliziranu metodu.

Prvi korak u predloženoj metodi jest procjena vremena odziva za čvor. Kako bi se procijenilo vrijeme odziva potrebno je koristiti neku od metoda procjene parametara koje su dobro poznate u literaturi. Jedna od često korištenih metoda je EWMA (korištena i opisana u poglavlju 6 kod CLMC metode).

EWMA metoda jako je rasprostranjena baš u području procjene kašnjenja u bežičnim senzorskim mrežama. Kao takva vrlo je jednostavna za implementaciju u mikroupravljače jer ne zahtijeva velike memorijske resurse niti veliki broj operacija za izračun. Kao što je predloženo u [132] ova metoda se vrlo učinkovito može koristiti s ciljem procjene (estimacije) kašnjenja u mreži, a samim time se može primijeniti na procjenu vremena odziva u BSAM i hibridnom modelu koordinacije.

Ako je RTT_n n -ti uzorak vremena odziva, njegova procjena može se izraziti kao:

$$\widehat{RTT}_n = f(RTT_{n-1}) \quad (6-7)$$

gdje se $\widehat{RTT}_n$ koristeći EWMA metodu dobiva kao:

$$\widehat{RTT}_n = \beta \cdot RTT_{n-1} + (1 - \beta) \cdot \widehat{RTT}_{n-1} \quad (6-8)$$

gdje je β faktor usrednjavanja $0 < \beta < 1$.

Iz navedene EWMA metode moguće je procijeniti vrijeme odziva paketa koji je odaslan, čime se omogućuje i procjena kvalitete usluge prema trenutnim uvjetima u mreži. Isto tako, dobivena procjena vrijednosti vremena odziva iznimno je bitna za rad predložene H-CLMC metode jer omogućuje rješavanje višekanalnog problema skrivenog čvora.

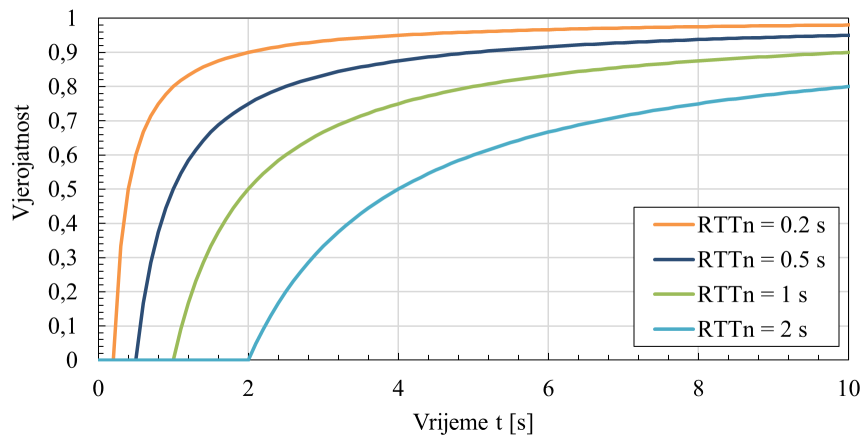
Kako je dobivena vrijednost vremena odziva procjena stvarne vrijednosti, ne može se sa si-

gurnošću reći da će odgovor na upit doći u procijenjenom vremenu, nego postoji mogućnost da se zbog zagušenja mreže to vrijeme produži. Ukoliko bi se procijenjeni parametar vremena odziva uzimao na deterministički način tijekom rada algoritma došlo bi do čvrste granice između promjene kanala koja bi bila uvjetovana samo procjenom vremena. U tom slučaju mogući ishodi uključuju i scenarij da se zbog produženog vremena odziva (nastalo zagušenjem u mreži) odgovor na upit ne dostavi unutar procijenjenog vremena odziva, što će ponovo rezultirati višekanalnim problemom skrivenoga čvora (prilikom promjene kanala).

Ovaj problem se može smanjiti ukoliko se procijenjeno vrijeme odziva ne uzima deterministički kao točno vrijeme između promjene kanala, nego stohastički pomoću vjerojatnosti. U tom slučaju dobiva se vjerojatnost promjene kanala u ovisnosti o procijenjenom vremenu odziva, tako da se procijenjeno vrijeme odziva uzima kao početna vrijednost vremena i to:

$$P_{RTT} = \begin{cases} 1 - \frac{\widehat{RTT}_n}{t} & , \text{ za } t \geq \widehat{RTT}_n \\ 0 & , \text{ za } t < \widehat{RTT}_n \end{cases} \quad (6-9)$$

gdje je t vrijeme koje je proteklo od posljednje promjene kanala a $\widehat{RTT}_n$ procijenjena vrijednost vremena odziva. Slika 6.10 prikazuje predloženi model vjerojatnosti za četiri različite vrijednosti procijenjenog vremena odziva.



Slika 6.10. Model vjerojatnosti promjene kanala u ovisnosti o vremenu, za različite vrijednosti procijenjenog vremena odziva $\widehat{RTT}_n$

Iz prikazanog dijagrama može se vidjeti na koji se način vjerojatnost promjene kanala mijenja tijekom vremena, od posljednje promjene kanala. Na primjeru vrijednosti $\widehat{RTT}_n = 2$ s iz dijagrama 6.10 može se uočiti kako je vjerojatnost promjene kanala jednaka nuli sve do procijenjenog vremena, što znači da se kanal neće promijeniti, tj. da je vjerojatnost da se promijeni kanal iznimno

mala (jer i za vrijednost $p = 0$ postoji mogućnost promjene kanala). Nakon proteka procijenjenog vremena odziva vjerojatnost eksponencijalno počinje rasti kako vrijeme protječe, čime se postupno povećava vjerojatnost promjene kanala.

Uvođenjem ovog mehanizma omogućuje se stohastička promjena kanala koja je ovisna o vremenu, no kao i u inicijalno predloženom CLMC protokolu, potrebne su ostale informacije sa svih slojeva za donošenje pravovremene odluke o promjeni kanala.

6.3.2. Proširenje klasifikatora statusa slojeva i procjena vjerojatnosti promjene kanala (EWMA metoda)

Nakon definirane vjerojatnosti promjene kanala, koja ovisi o procijenjenoj vrijednosti vremena odziva (RTT), potrebno je spomenutu informaciju združiti s inicijalnom CLMC metodom. Prema definiranoj CLMC metodi informacije s različitih slojeva ujedinjavaju se kroz klasifikator informacija, koji na temelju informacije o uspjehu ili neuspjehu slanja predlaže vjerojatnost zagušenja kanala (vidi 6.1). Prema klasifikatoru informacija, vjerojatnost zagušenja kanala jednog uzorka definirana je prema jednadžbi (6-5). Dobivena vjerojatnost za potvrdu svakog odaslanog upita prosljeđuje se u EWMA metodu, pomoću koje se procjenjuje vjerojatnost zagušenja trenutnog kanala. Procijenjena vjerojatnost zagušenja kanala dana je prema jednadžbi (6-6) te se u H-CLMC metodi definira kao:

$$p_n[c] = \hat{p}_n = \beta \cdot p_{n-1} + (1 - \beta) \cdot \widehat{p_{n-1}} \quad (6-10)$$

gdje vjerojatnost zagušenja kanala postaje niz (engl. *array*), a c predstavlja trenutni kanal. Stoga, čvor za trenutni kanal računa procijenjenu vrijednost vjerojatnosti zagušenja kanala te ju pohranjuje na položaj trenutnog kanala. Nakon promjene kanala mijenja se i pozicija estimatora vjerojatnosti zagušenja, što dovodi do stvaranja tablice vjerojatnosti zagušenja svih kanala na kojima je čvor komunicirao. Ovim se omogućuje širi pregled zagušenja u mreži (na sličnom principu kao i kod CONTROL metode).

Također, s informacijom o vjerojatnosti zagušenja na svim kanalima na kojima je čvor komunicirao moguće je izraziti prosječnu vjerojatnost zagušenja svih korištenih kanala kao:

$$p_{avg} = \frac{1}{C} \sum_{c=0}^{C-1} p_n[c] \quad (6-11)$$

gdje je C maksimalni broj kanala (krajnjih odredišta) u mreži.

Dobivenom informacijom moguće je procijeniti zagušenja na ostalim kanalima i sukladno tome donijeti bolju odluku o promjeni kanala.

6.3.3. Dohvaćanje CQPS podatka krajnjeg odredišta u mreži

U hibridnom modelu koordinacije jedan od pokazatelja opterećenja mreže jest CQPS - kumulativni broj upita u jedinici vremena (vidi 4). Predloženi CQPS pokazatelj definira ukupan broj upita u cijeloj mreži u jedinici vremena, koji je odaslan od strane čvorova u mreži. On se matematički može definirati i prema srednjoj vrijednosti vremena između slanja uzastopnih upita te broja aktivnih čvorova u mreži kao:

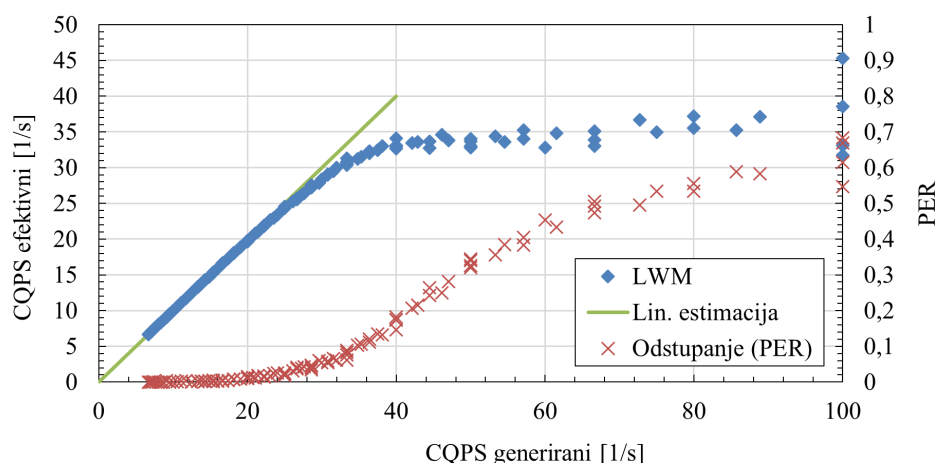
$$CQPS = \frac{N}{t_{avg}} \quad (6-12)$$

gdje je N broj aktivnih čvorova u mreži, t_{avg} prosječno vrijeme između slanja upita. Kako je pokazano u poglavlju 4.4.2 efektivna vrijednost CQPS-a linearno ovisi o generiranom CQPS-u mreže, sve do točke zasićenja kad mreža postaje previše zagušena i dolazi do odbacivanja paketa i degradacije kvalitete usluge. Isto se može zaključiti i za vrijednost CQPS-a na krajnjem odredištu u mreži (broj uspješno primljenih upita u jedinici vremena). Kako je odnos CQPS-a koji je generiran od strane čvorova i efektivnog CQPS-a linearan sve do točke zasićenja, može se definirati odstupanje generirane i efektivne CQPS vrijednosti, što u konačnici predstavlja gubitak paketa u mreži (PER, engl. *Packet Error Rate*) u uzlaznoj vezi (od čvora do krajnjeg odredišta u mreži):

$$PER = 1 - \frac{CQPS_{ef}}{CQPS} \quad (6-13)$$

gdje je $CQPS_{ef}$ efektivna (stvarna) vrijednost CQPS pokazatelja na krajnjem odredištu u mreži, dok je CQPS generirana vrijednost prometa od svih čvorova u mreži. Ovaj dijagram prikazan je na slici 6.11 gdje je pokazana spomenuta ovisnost za osnovni LWM protokol (simulacija).

Prema navedenom dijagramu može se uočiti kako je odstupanje (PER) efektivne od generirane vrijednosti CQPS pokazatelja manja ili jednaka 1 % sve do točke kad ta vrijednost počne naglo rasti, a samim time nastaje degradacija performansi u mreži. Spomenuto se događa za vrijednosti CQPS veće od 20 upita u sekundi. Nakon spomenute vrijednosti dolazi do odbacivanja paketa u mreži čemu je uzrok zagušenje i nagomilavanje paketa u red (međuspremnik). Stoga, cilj u uspostavi visoke kvalitete usluge je držati CQPS ispod određene vrijednosti kako bi se minimalizirala pogreška i odstupanje od linearne ovisnosti.



Slika 6.11. Odnos CQPS vrijednosti za generirani promet od strane mreže i efektivni promet (promet koji je uspješno primljen na odredištu)

Postupak definiranja točne vrijednosti *CQPS* pokazatelja nije jednostavan, jer ovisi o raznim parametrima u mreži. Očito je da će se ova vrijednost promijeniti za veći broj skokova u mreži, koji je izravno povezan s većim gubitkom paketa [133]. Stoga *CQPS* pokazatelj mreže treba uzeti kao pomoćnu informaciju koja može odlučiti o promjeni kanala, no nikako kao jedinu informaciju.

Kako bi se spomenuta *CQPS* informacija od krajnjih odredišta u mreži uspješno prosljedila do svih čvorova u mreži potrebno je primijeniti metodologiju koja ne unosi dodatni kontrolni promet u mrežu. U suprotnom dodatni kontrolni promet u mreži degradirao bi performanse mreže i smanjio kvalitetu usluge, što je dakako nepoželjno. Jedna od često korištenih metoda u literaturi jest modifikacija potvrdnog (ACK) paketa na način da se u isti ugradi potrebna informacija [134]. Ovim se izbjegava dodatni kontrolni promet dok se veličina ACK paketa povećava u zanemarivoj mjeri.

U korištenom LWM protokolu potvrdni paket na mrežnom sloju sastoji se od sljedećih polja (tablica 6.1).

Tablica 6.1. Okvir ACK paketa mrežnog sloja

Bitovi: 8	8	8
ID naredbe (0x00)	Broj sekvence	Kontrolna poruka

Iz prikazanog okvira može se vidjeti da spomenuti okvir sadrži kontrolna polja kao što su **ID naredbe** i **Broj sekvence** te sadrži proizvoljno polje **Kontrolna poruka**. Ovo proizvoljno polje koje se nalazi u ACK paketu ne koristi se u radu protokola nego je ostavljeno kao polje u koje korisnik može pohraniti proizvoljnu informaciju duljine 8 bitova (1 Bajt). Sukladno tome u H-

CLMC protokolu ovo polje koristi se za slanje CQPS informacije od krajnjih odredišta do čvorova u mreži (podsjetimo se da se u hibridnom modelu koordinacije upiti šalju krajnjem odredištu u mreži, koje dobiveni upit potvrđuje mrežnim ACK paketom, a nakon obrade šalje i odgovor na upit).

Modificirani okvir mrežnog ACK paketa sada poprima sljedeći izgled (tablica 6.2):

Tablica 6.2. Okvir modificiranog ACK paketa mrežnog sloja

Bitovi: 8	8	8
ID naredbe (0x00)	Broj sekvence	CQPS [1/s]

Predloženom modifikacijom protokolnog stoga omogućuje se da svaki čvor dobije informaciju o trenutnoj vrijednosti CQPS pokazatelja od krajnjeg odredišta, tj. trenutnog kanala na kojemu se odvija komunikacija (podsjetimo se da je broj kanala u mreži jednak broju krajnjih odredišta, tj. svako krajnje odredište u mreži koristi drugi kanal). Isto kao i u prethodnom poglavlju dobiveni podatak CQPS-a pohranjuje se u tablicu pridružen s rednim brojem kanala na kojem je pokazatelj primljen $CQPS_c$ (gdje je c redni broj trenutnog kanala).

S druge strane, problem u korištenju CQPS podatka nastaje zbog činjenice da je nezahvalno definirati čvrstu granicu nakon koje performanse mreže degradiraju. Stoga se uzorom na ACS metodu uvodi izračun vjerojatnosti promjene kanala p_{CQPS} koja ovisi o vrijednosti CQPS pokazatelja na trenutnom kanalu i prosječne vrijednosti CQPS pokazatelja na svim kanalima na kojima je čvor komunicirao kao:

$$p_{CQPS} = \frac{CQPS[c] - CQPS_{avg}}{CQPS[c]} \quad (6-14)$$

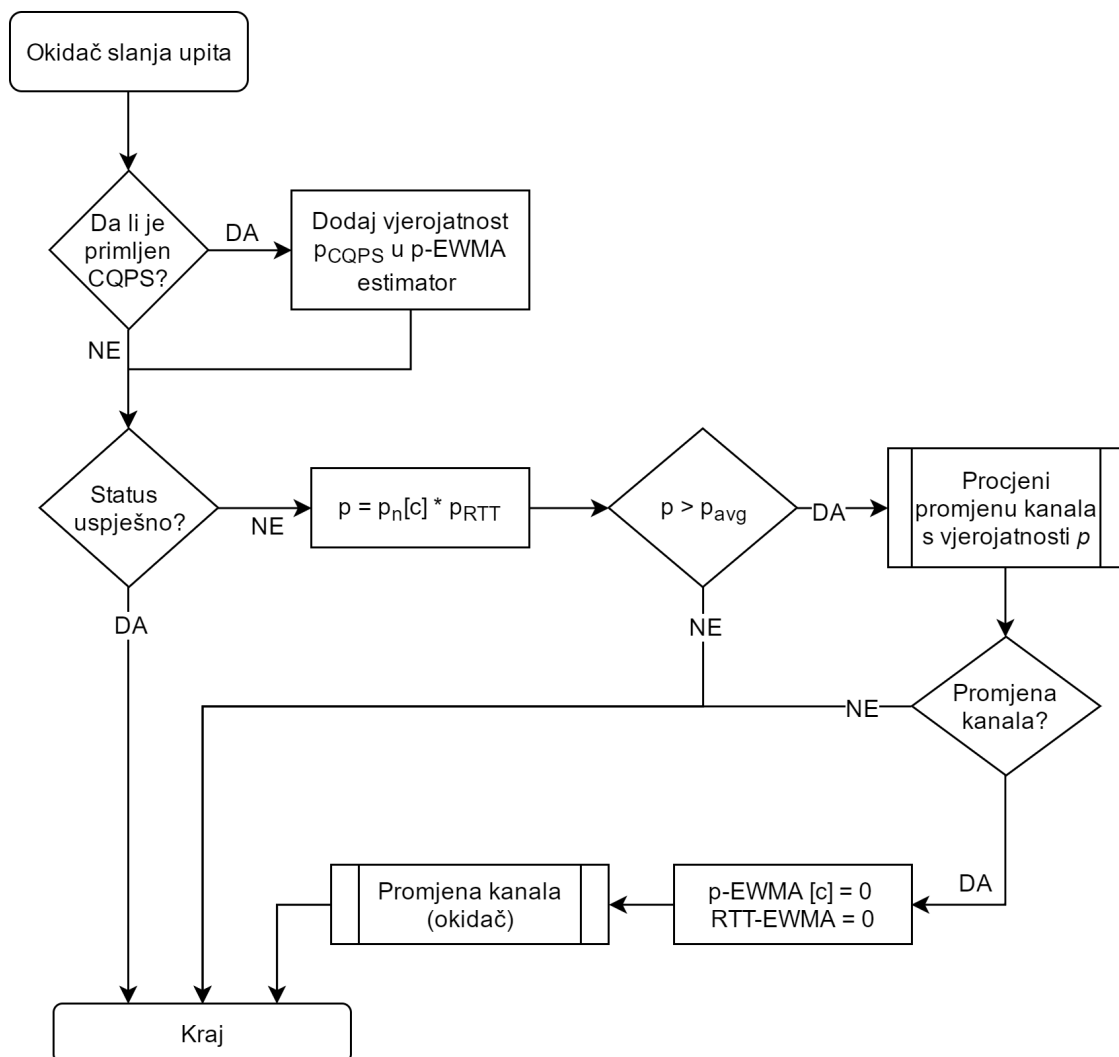
gdje je $CQPS_{avg}$ prosječna vrijednost CQPS pokazatelja za sve kanale na kojima je čvor komunicirao a $CQPS_c$ vrijednost na trenutnom kanalu c . Predloženim postupkom dobiva se vjerojatnost da je trenutni kanal više zagušen nego ostali kanali na kojima je čvor komunicirao, što će biti upotrijebljeno u H-CLMC algoritmu.

6.3.4. Unaprjeđenje algoritma procjene promjene kanala : H-CLMC algoritam

Središnji dio H-CLMC metode predstavlja algoritam promjene kanala (H-CLMC algoritam). Prema predloženom blok dijagramu H-CLMC metode (slika 6.9) spomenuti algoritam uzima kao ulazne parametre sva poboljšanja koja su navedena u prijašnjim potpoglavljima, koja su rezultirala sljedećim parametrima:

- p_{RTT} - vjerojatnost da se kanal treba promijeniti temeljem procijenjene vrijednosti vremena odziva (EWMA metoda),
- $p_n[c]$ - vjerojatnost da je kanal c zagušen na temelju klasificiranog statusa sa svakog sloja i EWMA metode procjene,
- p_{avg} - prosječna vjerojatnost zagušenja svih kanala na kojima je čvor vršio komunikaciju,
- p_{CQPS} - vjerojatnost da je kanal zagušen na temelju primljene CQPS informacije ugrađene u mrežni ACK paket te
- *Status* - definira da li je upit uspješno odaslan krajnjem čvoru u mreži ili ne.

Na temelju navedenih parametara, cilj algoritma je odrediti optimalni trenutak za promjenu kanala. Algoritam je uvjetovan okidačem slanja upita, što znači da se funkcionalnost algoritma pokreće u trenutku kad aplikacija pošalje upit prema krajnjem odredištu u mreži. Dijagram toka predloženog H-CLMC algoritma prikazan je na slici 6.12.



Slika 6.12. Dijagram toka predloženog H-CLMC algoritma

Algoritam se pokreće u trenutku kad čvor započne slanje upita u hibridnom modelu koordinacije (okidač slanja upita). Nakon pokretanja algoritam provjerava da li je prije primljen CQPS pokazatelj (od prijašnjih upita). Ukoliko postoji CQPS podatak algoritam uzima izračunatu vjerojatnost p_{CQPS} dobivenu pomoću jednadžbe (6-14) te istu dodaje kao trenutni podatak p-EWMA estimatora. Nakon toga slijedi provjera da li je zadnji upit odaslan uspješno ili neuspješno. Ukoliko je zadnji upit odaslan uspješno, procjena je da nema potrebe za promjenom kanala, čime algoritam završava. Ukoliko je posljednji upit bio neuspješan (čvor nije mogao pristupiti kanalu, nije primljen ACK) započinje se s procjenom promjene kanala.

Prije procjene promjene kanala potrebno je izračunati ukupnu vjerojatnost promjene kanala koja se dobije kao umnožak vjerojatnosti zagušenja na trenutnom kanalu $p_n[c]$ i vjerojatnosti promjene kanala dobivene od zadnjeg vremena promjene kanala. Ovdje je predložen umnožak vjerojatnosti jer je cilj dobiti ukupnu vjerojatnost oba događaja. Nakon dobivene vjerojatnosti p algoritam procjenjuje da li je ukupna vjerojatnost promjene kanala veća od prosječne vjerojatnosti zagušenja svih kanala (jednadžba (6-11)). Ukoliko je taj uvjet ispunjen pristupa se procjeni promjene kanala s vjerojatnošću p . Ova procjena modelirana je stohastički, što znači da se promjena kanala ostvaruje uvjetovana vjerojatnošću p . Ukoliko se procijeni da je potrebno promijeniti kanal, trenutne vrijednosti EWMA estimatora se poništavaju, zapisuje se vrijeme promjene kanala te se poziva okidač promjene kanala prema fizičkom sloju.

Ovim završava predloženi algoritam te se pri ponovnom slanju upita isti ponovo pokreće. Treba napomenuti da se promjena kanala vrši dovoljno rano (prije slanja RF paketa upita), stoga ne dolazi do problema pokušaja slanja dok je primopredajnik u procesu promjene kanala.

6.3.5. Mrežni sloj i usmjeravanje u višekanalnoj arhitekturi

Usmjeravanje u višekanalnoj arhitekturi predstavlja netrivialni problem. Kao što je opisano u petom poglavlju protokol usmjeravanja predstavlja bitan faktor u uspostavi uspješne komunikacije. Zbog činjenice da je naglasak ove disertacije stavljen na međuslojni algoritam koji upravlja promjenom kanala, sam protokol usmjeravanja nije u primarnom fokusu disertacije. U ovom poglavlju bit će razmatran postupak komunikacije na aktorskom čvoru u mreži, a ne na usmjerivačkim čvorovima.

No ipak, kako bi višekanalna komunikacija bila moguća potrebna je modifikacija postojećeg protokola usmjeravanja kako bi obuhvatio višekanalnu arhitekturu. Razlog tome jest problem postojećih protokola usmjeravanja u smislu višekalnog problema skrivenog čvora. Naime, algo-

ritam usmjeravanja ima zadaću definiranja optimalne trase propagacije podataka kroz mrežu i u svom radu pretpostavlja da je cijela mreža na jednom kanalu, tj. da ne postoji mogućnost pojave višekanalnog problema skrivenog čvora.

Zbog činjenice da aktorski čvorovi koriste predloženu višekanalnu metodu, prilikom promjene kanala događa se pojava da algoritam usmjeravanja i mrežni sloj nisu svjesni promjene kanala te pretpostavlja da se sva komunikacija odvija na jednokanalnoj arhitekturi. U tom slučaju nakon promjene kanala mrežni sloj će nastaviti s usmjeravanjem paketa prema tablicama usmjeravanja prethodnog kanala te zbog višekanalnog problema skrivenog čvora podatci se neće moći dostaviti na krajnje odredište u mreži. Nakon što protokol usmjeravanja detektira nepostojanje sljedećih skokova u mreži, započet će postupak otkrivanja trase kroz mrežu, no u međuvremenu će se stvoriti kašnjenje, odbacivanje paketa i degradacija kvalitete usluge.

Kako bi se ovaj problem izbjegao predložena je modifikacija protokola usmjeravanja na način da se uvodi novo polje s oznakom kanala na kojem se paket usmjerava (tablica 6.3), uzorom na protokol usmjeravanja predložen u [116].

Tablica 6.3. Modifikacija tablice usmjeravanja za primjenu u višekanalnoj arhitekturi

Bit:	4	1	1	2	4	16	16	8	8
Polje:	kanal	fiksno	multicast	rezerv.	razultat	odrAdr	sljHopAdr	rang	lqi

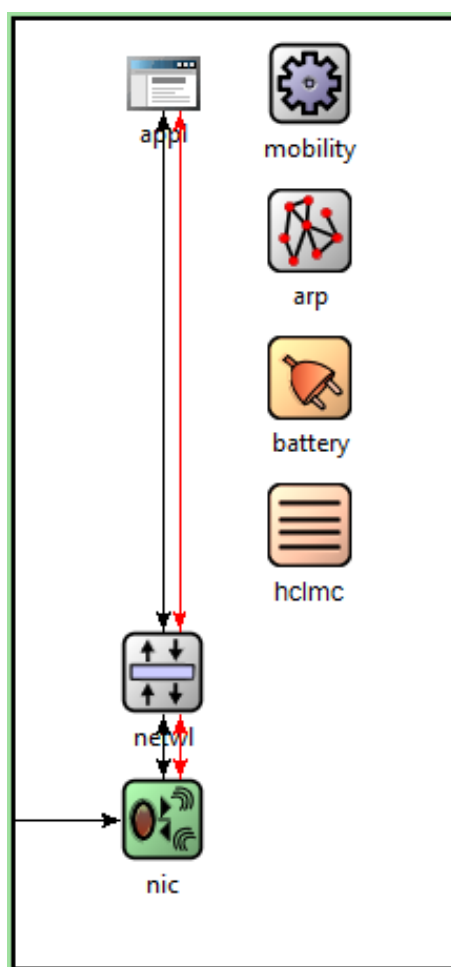
Iz predložene modifikacije tablice usmjeravanja uočava se kako je dodano polje *kanal* (označeno crvenom bojom u tablici 6.3) koje označava na kojem kanalu je paket primljen. U slučaju da je potrebno vršiti otkrivanje nove trase kroz mrežu, algoritam usmjeravanja će izvršiti RREQ (zahtjev za trasom) te će nakon primitka RREP (odgovora na zahtjev) pohraniti unos u tablicu za trenutni kanal na kojemu je čvor primio paket. U slučaju da se s aplikacijskog sloja šalje paket prema odredištu u mreži, protokol usmjeravanja će iz tablice usmjeravanja pronaći trasu za trenutni kanal na kojemu je čvor te izvršiti slanje prema sljedećem skoku.

Ukoliko je čvor promijenio kanal i za trenutni kanal ne postoji put prema odredištu, isti će pokrenuti postupak otkrivanja puta i nakon primitka odredišta istu pohraniti u tablicu usmjeravanja kao novi unos. Nakon što čvor promjeni sve raspoložive kanale u tablicama usmjeravanja bit će zapisane sve trase na svim kanalima, stoga prilikom sljedeće promjene kanala neće biti potrebno vršiti RREQ i otkrivanje puta.

6.3.6. Objedinjenje predložene metode u cjeloviti protokol komunikacije

Kako je prikazano u prethodnim poglavljima, unaprjeđenje inicijalno predložene CLMC metode sadrži četiri koraka poboljšanja, koji su rezultirali novom H-CLMC metodom. Sama metoda sastoji se od postupaka klasifikacije informacija sa slojeva protokolnog stoga, postupaka izračuna vrijednosti parametara p_{RTT} , $p_n[c]$, p_{avg} , p_{CQPS} te H-CLMC algoritma koji koristi dobivene vrijednosti. Kako bi se predložena metoda mogla u potpunosti integrirati u protokolni stog potrebno je isto primijeniti na postojeći LWM protokol i njegov stog.

Kao i kod CLMC metode sama primjena metode na LWM protokol je prilično jednostavna te je H-CLMC metoda integrirana kao zasebni modul s vezama na sve slojeve protokolnog stoga (slika 6.13).



Slika 6.13. Izgled protokolnog stoga implementirane H-CLMC metode i algoritma u OMNeT++ simulatoru

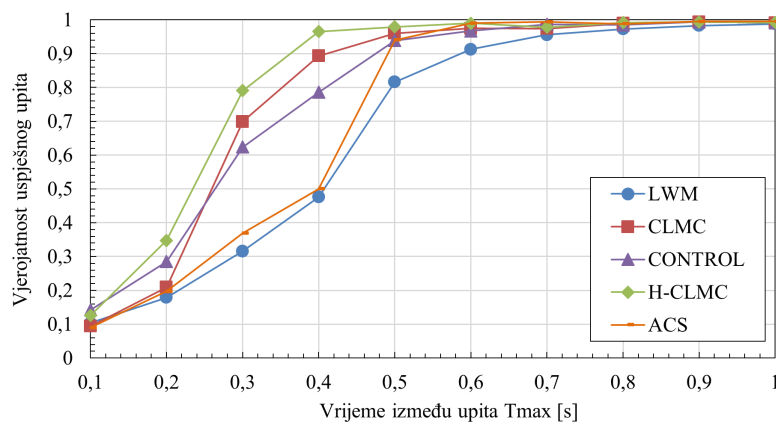
6.4. Vrednovanje predloženog protokola u mreži s jednim skokom

Nakon predloženog H-CLMC protokola pristupilo se njegovom vrednovanju. Vrednovanje je provedeno metodom simulacije prema definiranom simulacijskom okruženju u poglavlju 4.4: Mreža se sastoji od ukupno M čvorova, gdje su N čvorova aktivni čvorovi (čvorovi koji šalju upite). Čvorovi su postavljeni nasumično unutar promatranog područja od 100m x 100m gdje je domet čvora veći nego dijagonala područja. U ovom slučaju komunikacija je u jednom skoku, bez usmjeravanja. U mreži je prisutno C krajnjih odredišta u mreži i isto toliko komunikacijskih kanala je dodijeljeno. Svako krajnje odredište u mreži je postavljeno na drugi kanal. Krajnjim odredištima u mreži su statički dodijeljeni kanali, koji se ne preklapaju. Korištene metrike kvalitete usluge definirane su u poglavlju 4 (vjerojatnost uspješnog upita, srednje i maksimalno vrijeme odziva). Simulacija je provedena za 100 uzastopnih upita generiranih od svih čvorova, prema krajnjem odredištu, u definiranom načinu rada hibridnog modela koordinacije te u kritičnom scenariju komunikacije (svi čvorovi u mreži u isto vrijeme šalju upite prema krajnjem odredištu). Svaka točka na dijagramu dobivena je kao srednja vrijednost 5 pokusa.

Vrednovanje je provedeno za broj aktivnih čvorova od 10 do 40 te za različita maksimalna vremena između slanja upita T_{max} . Predloženi H-CLMC protokol uspoređen je s metodama CLMC, CONTROL i ACS te osnovnim LWM protokolom.

6.4.1. Scenarij s 10 i 20 aktivnih čvorova u mreži

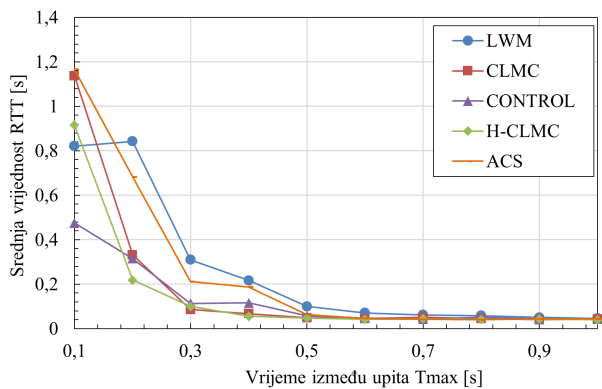
Rezultati vjerojatnosti uspješnog upita za scenarij sa 10 aktivnih čvorova i 2 krajnja odredišta u mreži prikazani su na slici 6.14.



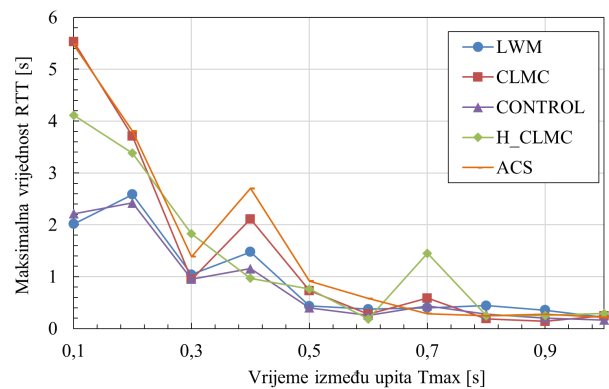
Slika 6.14. Vjerojatnost uspješnog upita u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=10$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta

Prema dijagramu vjerojatnosti uspješnog upita prikazanog na slici 6.14 prikazani su podatci simulacije napravljene za CLMC metodu, uz dodani unaprijeđeni H-CLMC protokol. Vidljivo je kako predloženi H-CLMC protokol ostvaruje najveću vrijednost vjerojatnosti uspješnog upita te za vrijednost $T_{max} = 0,4$ s ostvaruje poboljšanje vjerojatnosti za 100 % u odnosu na osnovni protokol te 22 % u odnosu na CONTROL metodu. Također, prije opisani problem CLMC algoritma za jače zagušenje mreže je otklonjen, stoga je poboljšanje performansi vidljivo i u području jakog zagušenja mreže za H-CLMC protokol.

Ukoliko se analizira srednja vrijednost vremena odziva (RTT) može se vidjeti kako predloženi H-CLMC protokol smanjuje vrijeme odziva u odnosu na CLMC te u velikom rasponu ostvaruje smanjenje vremena odziva (slika 6.15a). Vidljivo je da u slučaju jakog zagušenja (za $T_{max} = 0,1$ s) dolazi do povećavanja vremena odziva za H-CLMC protokol. Ovo se može pripisati povećanoj pouzdanosti mreže, što će u uvjetima jakog zagušenja rezultirati da će paketi koji su prije bili odbačeni iz repova sada biti uspješno poslani, no s većim kašnjenjem.



(a) Srednja vrijednost



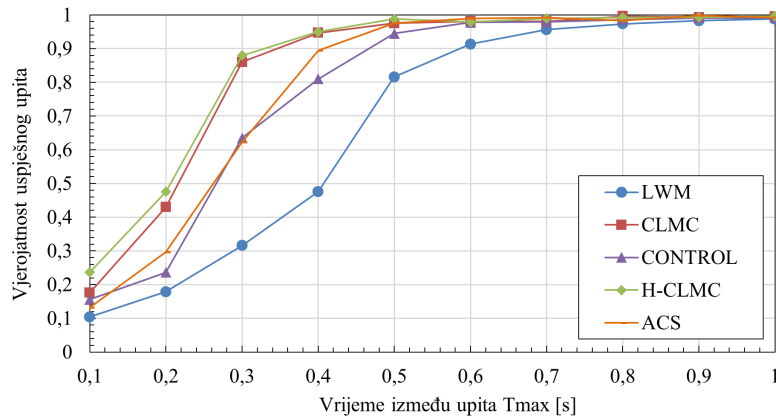
(b) Maksimalna vrijednost

Slika 6.15. Vrijeme odziva u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=10$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta

Navedena tvrdnja potvrđena je analizom maksimalnog vremena odziva (slika 6.15b) gdje se može vidjeti da predloženi H-CLMC protokol povećava maksimalno vrijeme odziva u uvjetima jakog zagušenja mreže, iznad maksimalnog vremena odziva osnovnog LWM protokola.

Iz spomenutog dijagrama može se uočiti kako najmanju vrijednost maksimalnog vremena odziva ima CONTROL protokol, što se može pripisati smanjenoj vjerojatnosti uspješnog upita, pri čemu dolazi do odbacivanja paketa koji se nalaze duže vrijeme u redovima (međuspremnicima). Za scenarij manjeg zagušenja može se uočiti kako maksimalno vrijeme odziva pada na razinu osnovnog protokola (ili manje), uz povećanu vjerojatnost uspješnog upita.

Kako bi se napravilo daljnje vrednovanje potrebno je ispitati utjecaj više kanala na kvalitetu

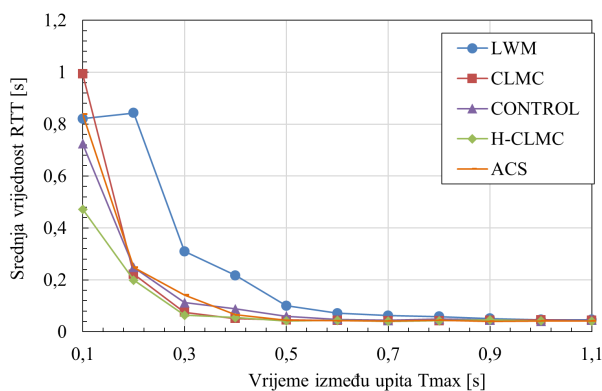


Slika 6.16. Vjerojatnost uspješnog upita u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=10$ aktivnih čvorova, $C=3$ krajnja odredišta

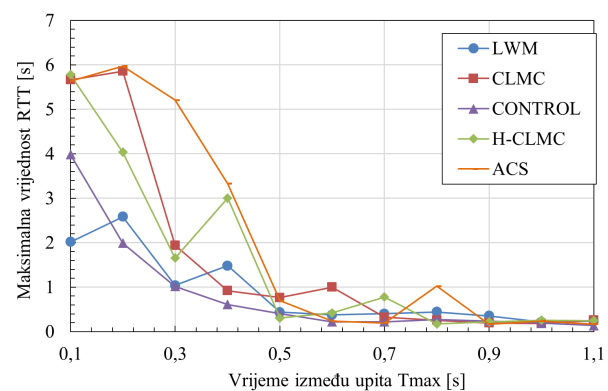
usluge u mreži. Na slici 6.16 prikazana je vjerojatnost uspješnog upita za tri krajnja odredišta u mreži i ukupno tri korištena kanala.

Prema dijagramu na slici 6.16 uočava se kako predloženi H-CLMC protokol i dalje ima najveću vjerojatnost uspješnog upita u svim uvjetima zagušenja u mreži. Isto tako, očito je kako se povećanjem broja kanala smanjuje razlika između inicijalno predloženog CLMC protokola i H-CLMC protokola. No također, razlika H-CLMC protokola u odnosu na ostala rješenja se povećala, iz čega se može zaključiti kako H-CLMC pruža bolju kvalitetu usluge za veći broj krajnjih odredišta u mreži s jednim skokom.

Ukoliko se analizira H-CLMC protokol u odnosu na srednje vrijeme kašnjenja (slika 6.17a) očito je kako predloženi H-CLMC protokol ostvaruje bolje performanse (manje vrijeme odziva) u mreži s većim brojem krajnjih odredišta (kanala). Ova prednost se može objasniti mogućnošću



(a) Srednja vrijednost



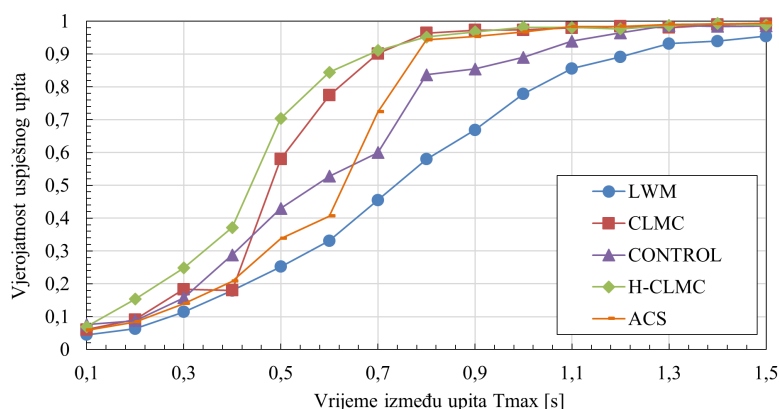
(b) Maksimalna vrijednost

Slika 6.17. Vrijeme odziva u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=10$ aktivnih čvorova, $C=3$ krajnja odredišta

protokola da ostvari brzu promjenu kanala kada je to potrebno, dok kasnije ograničuje broj promjena kanala u jedinici vremena.

Prema dijagramu maksimalne vrijednosti vremena odziva 6.17b može se doći do istog zaključka kao i kod scenarija s dva krajnja odredišta u mreži.

Sljedeći scenarij vrednovanja obuhvaća 20 aktivnih čvorova u mreži, gdje je vjerojatnost uspješnog upita za dva krajnja odredišta u mreži prikazana na slici 6.18.

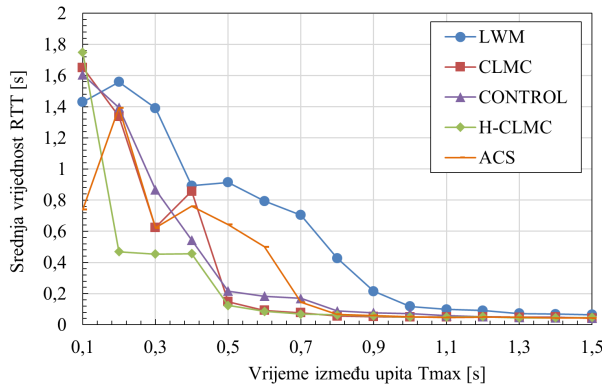


Slika 6.18. Vjerojatnost uspješnog upita u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=20$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta

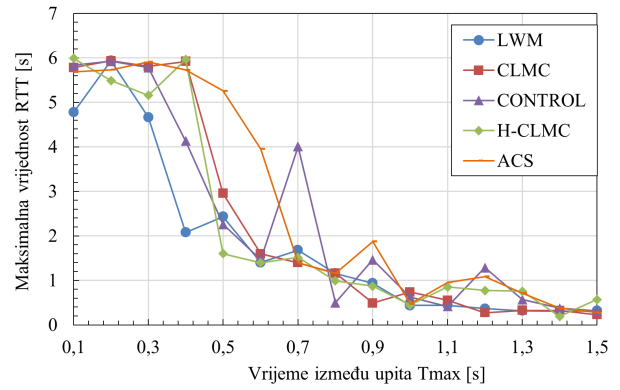
Prema vjerojatnosti uspješnog upita u ovom scenariju i prikazanog dijagrama predloženi H-CLMC protokol ostvaruje najveću vjerojatnost uspješnog upita te je poboljšanje performansi jednako izraženo kao i u scenariju s 10 aktivnih čvorova. Ovdje se može vidjeti da se za ekvivalentni iznos T_{max} (uz $CQPS = konst.$) ostvaruje jednako poboljšanje performansi za predloženi H-CLMC protokol, dok CONTROL metoda ostvaruje manje poboljšanje nego u manjoj mreži. Povećanje broja čvorova u mreži pogoduje i ACS metodi, pa tako ona dostiže CONTROL metodu po performansama. Isto tako, evidentno je poboljšanje H-CLMC metode u odnosu na inicijalno predloženu CLMC metodu.

Sa aspekta vremena odziva (slika 6.19) iz srednje vrijednosti vremena odziva vidljivo je da predloženi H-CLMC protokol ostvaruje najmanje vrijednosti srednjeg vremena odziva za većinu raspona vrijednosti T_{max} , dok u vrlo uskom području jakog zagušenja ostvaruje nešto veće vrijeme odziva.

U usporedbi s inicijalno predloženom CLMC metodom, iz spomenutog dijagrama vidljivo je kako H-CLMC ostvaruje manje vrijednosti vremena odziva u svim područjima. Što se tiče maksimalne vrijednosti vremena odziva, niti jedan od analiziranih protokola ne ostvaruje značajnije smanjenje maksimalnog vremena odziva te u scenariju jakog zagušenja ostvaruju maksimalno



(a) Srednja vrijednost

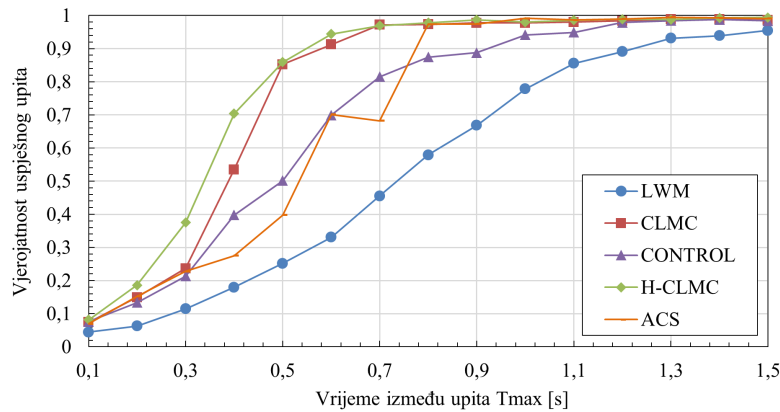


(b) Maksimalna vrijednost

Slika 6.19. Vrijeme odziva u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=20$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta

kašnjenje mreže. Daleko najlošije performanse sa aspekta maksimalnog vremena odziva ostvaruje ACS metoda.

Povećanjem broja krajnjih odredišta u mreži omogućuje se distribucija opterećenja mreže na više kanala, čime se poboljšavaju performanse mreže. To je vidljivo i za scenarij s 20 aktivnih čvorova (slika 6.20)

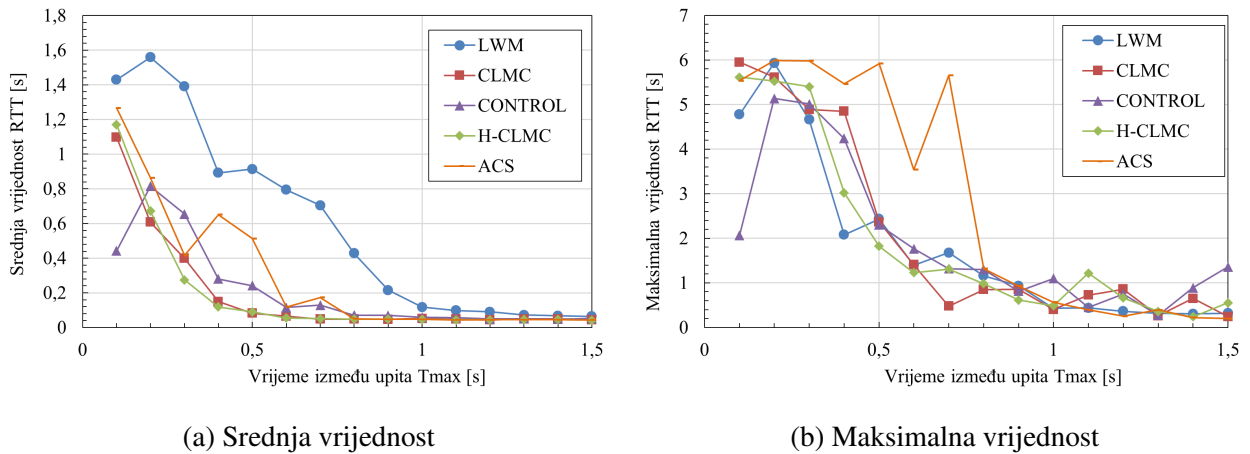


Slika 6.20. Vjerojatnost uspješnog upita u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=20$ aktivnih čvorova, $C=3$ krajnja odredišta

U ovom scenariju protokol H-CLMC ostvaruje poboljšanje od čak 2,85 puta (što je 185 %) za vrijednost $T_{max} = 0,6$ s. Također može se vidjeti kako ACS metoda poboljšava performanse prema metodi CONTROL, no ostvaruje bolje vrijednosti za manji broj odredišta.

Ukoliko se analizira vrijeme odziva za scenarij s 20 aktivnih čvorova i tri krajnja odredišta u mreži (slika 6.21a) može se zaključiti kako predloženi H-CLMC protokol ostvaruje najmanju vrijednost vremena odziva za većinu raspona T_{max} . U području jakog zagušenja ($T_{max} < 0,2$ s)

metoda CONTROL ostvaruje manje vrijednosti vremena odziva, zbog nešto manjeg broja primljenih paketa, dok za manje vrijednosti zagušenja ostvaruje veće vrijeme odziva. Sve metode u ovom slučaju ostvaruju smanjenje vremena odziva u usporedbi s osnovnim jednokanalnim LWM protokolom.



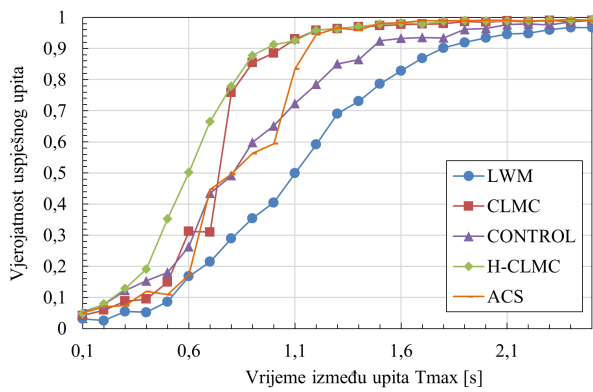
Slika 6.21. Vrijeme odziva u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=20$ aktivnih čvorova, $C=3$ krajnja odredišta

Promatrajući maksimalne vrijednosti vremena odziva (slika 6.21b) očito je kako niti jedan od analiziranih protokola i metoda ne ostvaruje značajno smanjenje maksimalnog vremena odziva. Treba napomenuti kako ACS metoda ostvaruje najveće maksimalno vrijeme odziva tj. najlošije performanse.

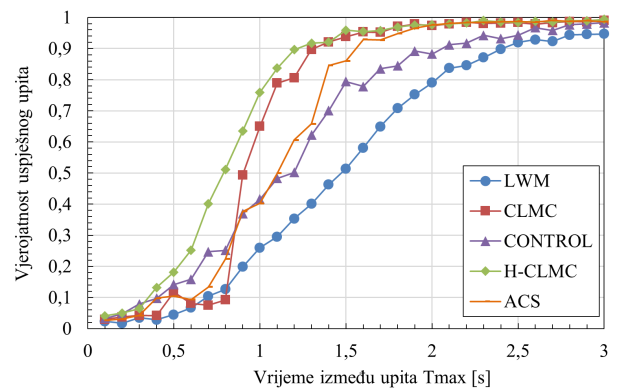
6.4.2. Scenarij s 30 i 40 aktivnih čvorova u mreži

U ovom scenariju analizirati će se povećanje broja aktivnih čvorova na performanse predloženog H-CLMC protokola za 30 i 40 aktivnih čvorova te dva krajnja odredišta u mreži (slika 6.22).

U mreži s 30 aktivnih čvorova (slika 6.22a) uočava se kako predloženi H-CLMC protokol ostvaruje najveću vjerojatnost uspješnog upita u svim rasponima T_{max} . Kao i kod prethodnih scenarija ovdje se može vidjeti prednost predloženog H-CLMC protokola u odnosu na inicijalni CLMC u području većeg zagušenja (u ovom slučaju $T_{max} < 0,8$ s). Vrlo slična situacija nazire se i za 40 aktivnih čvorova u mreži (slika 6.22a). U ovom scenariju daleko najbolje performanse pokazuje predloženi H-CLMC protokol, dok CONTROL metoda pokazuje najlošije performanse u odnosu na osnovni LWM protokol. Isto tako, može se vidjeti kako povećanjem broja čvorova ACS metoda ostvaruje bolje performanse nego CONTROL, što je vidljivo usporedbom dijagrama za 30 i 40 aktivnih čvorova u mreži. Iz spomenutog, može se zaključiti kako je ACS metoda skalabilnija od CONTROL metode.



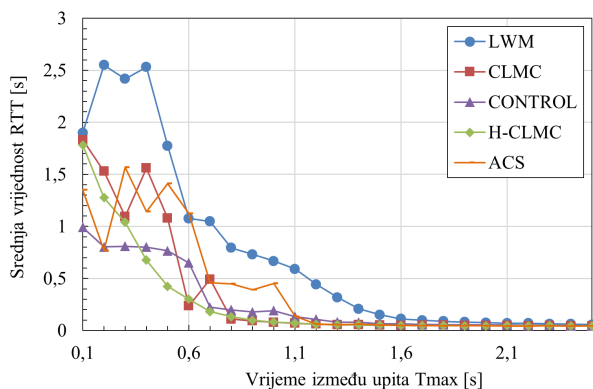
(a) N=30 aktivnih čvorova



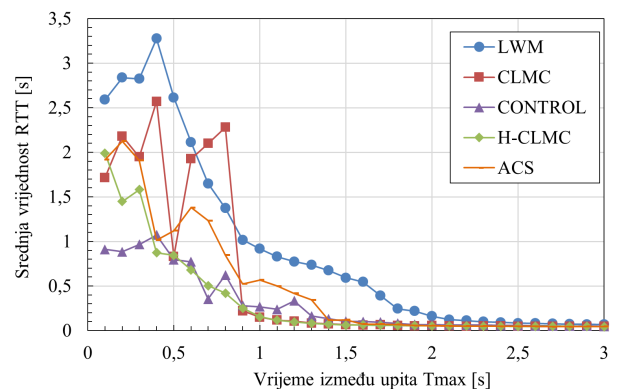
(b) N=40 aktivnih čvorova

Slika 6.22. Vjerojatnost uspješnog upita u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $C=2$ krajnja odredišta

Ukoliko se isto analizira sa strane vremena odziva (slika 6.23) na prvi pogled može se zaključiti da sve metode u mreži sa 30 i 40 aktivnih čvorova ostvaruju smanjenje vremena odziva i samim time poboljšanje kvalitete usluge.



(a) N=30 aktivnih čvorova



(b) N=40 aktivnih čvorova

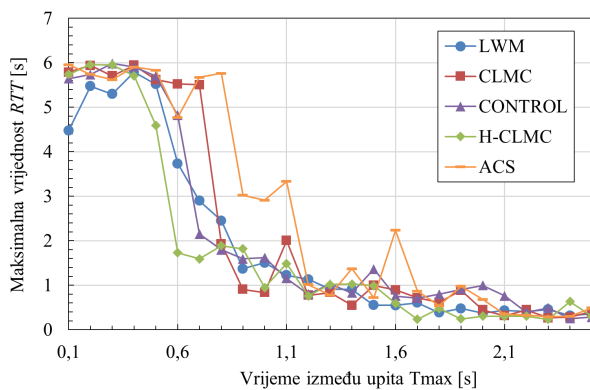
Slika 6.23. Srednje vrijeme odziva u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $C=2$ krajnja odredišta

Za mrežu s 30 aktivnih čvorova (slika 6.23a) očito je kako predloženi H-CLMC protokol ostvaruje najmanju vrijednost vremena odziva u uvjetima manjeg zagušenja u mreži (u ovom slučaju $T_{max} > 0,4$ s), dok u slučaju većeg zagušenja mreže manju vrijednost vremena odziva ostvaruje CONTROL i ACS. Ovo se može pripisati većem broju primljenih paketa za H-CLMC protokol te činjenici da je zagušenje mreže veliko te je samim tim čekanje u redu paketa povećano. Treba napomenuti kako sve metode ostvaruju manju vrijednost vremena odziva nego osnovni LWM protokol.

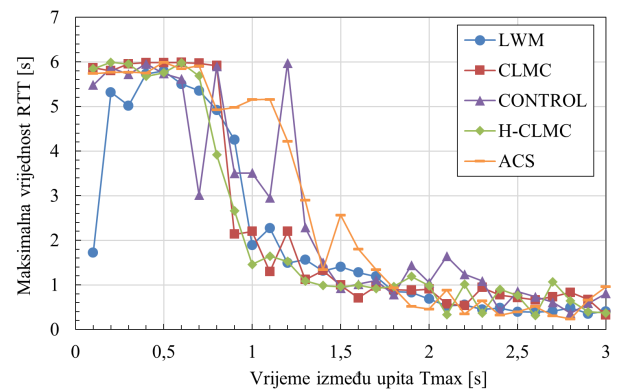
U mreži s 40 aktivnih čvorova (slika 6.23a) vrlo je slična situacija kao i u prethodnom scena-

riju. Očito je kako predloženi H-CLMC ostvaruje najmanje oscilacije vremena odziva, no metoda CONTROL ostvaruje najmanje vrijednosti vremena odziva. Ipak, u usporedbi s CLMC protokolom H-CLMC ostvaruje puno manje vrijednosti vremena odziva čime se dokazuje poboljšanje protokola sa strane kvalitete usluge.

Situacija kod maksimalnog vremena odziva je slična (slika 6.24) kako i u prethodnim scenarijima. Niti jedna metoda ne ostvaruje značajno smanjenje maksimalne vrijednosti vremena odziva, dok u mreži s 30 aktivnih čvorova H-CLMC protokol ipak ostvaruje manje vrijednosti u području prijelaza prema jakom zagušenju mreže (u ovom slučaju $T_{max} < 0,6$ s).



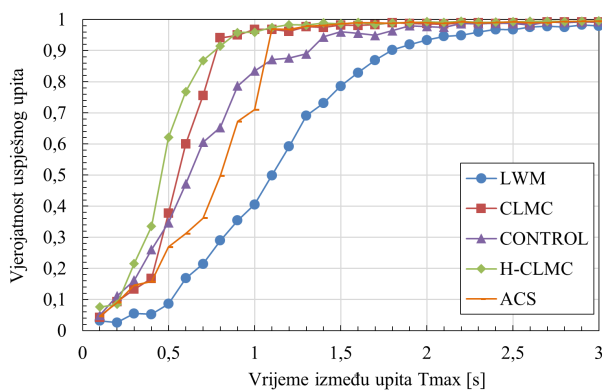
(a) N=30 aktivnih čvorova



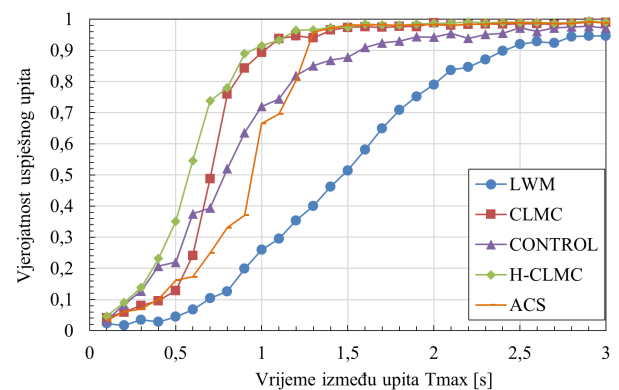
(b) N=40 aktivnih čvorova

Slika 6.24. Maksimalno vrijeme odziva u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; C=2 krajnja odredišta

Naposljetku, zadnja analiza mreža s jednim skokom uzima u obzir mrežu s 30 i 40 aktivnih čvorova te tri krajnja odredišta u mreži (slika 6.25).



(a) N=30 aktivnih čvorova



(b) N=40 aktivnih čvorova

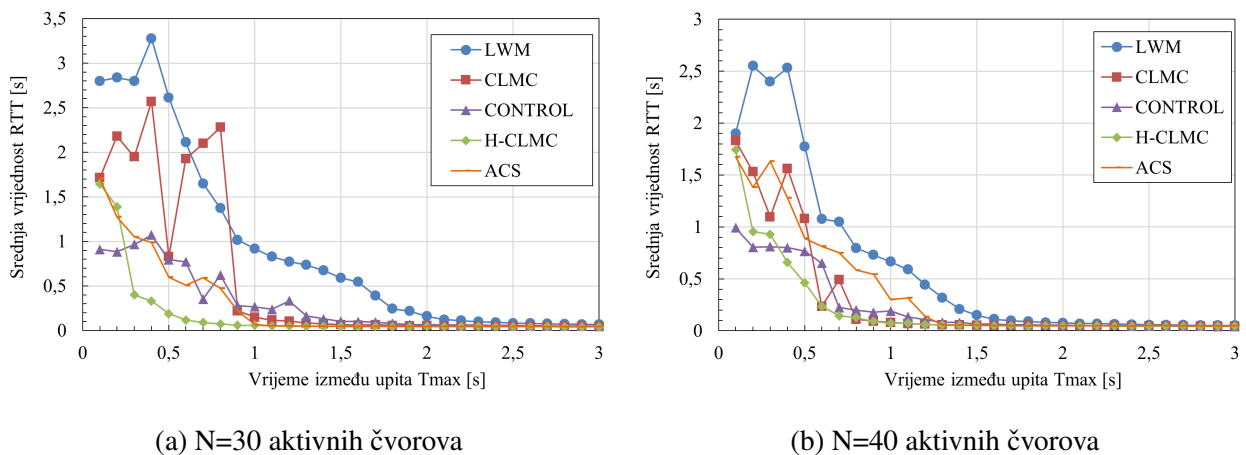
Slika 6.25. Vjerojatnost uspješnog upita u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; C=3 krajnja odredišta

U mreži sa 30 aktivnih čvorova i tri krajnja odredišta (slika 6.25a) može se uočiti kako predlo-

ženi H-CLMC protokol ostvaruje najveću vjerojatnost uspješnog upita, za veliki raspon vrijednosti T_{max} . Može se uvidjeti malo odstupanje pri vrijednosti od $T_{max} = 0,2$ s, gdje H-CLMC ostvaruje nešto manju vjerojatnost uspješnog upita nego ostali algoritmi, no unutar 5 % razlike. Također, očito je kako u ovom scenariju H-CLMC protokol ostvaruje poboljšanje vjerojatnosti uspješnog upita za 4 puta (300 % poboljšanje) u usporedbi s osnovnim LWM protokolom, 33 % u usporedbi sa CONTROL metodom te 138 % u usporedbi s ACS metodom za $T_{max} = 0,7$ s.

U mreži s 40 aktivnih čvorova (slika 6.25b) situacija je jednaka kao i u prethodno analiziranoj mreži; H-CLMC protokol ostvaruje najbolje performanse i u usporedbi s LWM protokolom ostvaruje poboljšanje od 6 puta (500 % poboljšanje), 50 % poboljšanje u usporedbi s CONTROL metodom te 135 % u usporedbi s ACS metodom za $T_{max} = 0,7$ s.

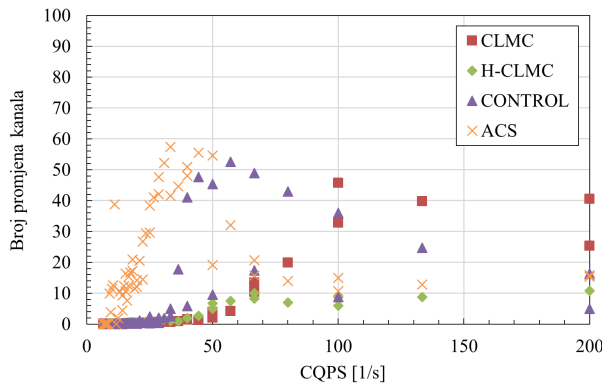
Analiza vremena odziva za mreže s 30 i 40 aktivnih čvorova (slika 6.26) pokazuje jednaku situaciju kao i u prethodnim scenarijima: predloženi H-CLMC protokol ostvaruje najmanje vrijednosti vremena odziva u području manjeg zagušenja mreže. U području većeg zagušenja mreže dolazi do određenog povećanja vremena odziva, isto kako je opisano i u prethodnim scenarijima, čime se potvrđuje dosljednost metode i protokola.



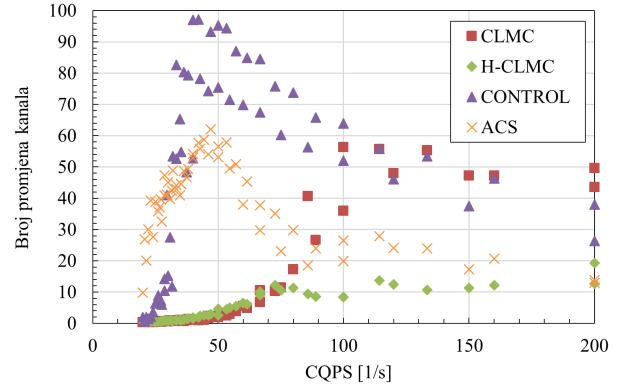
Slika 6.26. Srednje vrijeme odziva u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; C=3 krajnja odredišta

Naposljetku, promatran je broj promjena kanala protokola u ovisnosti o CQPS pokazatelju. Prikazana su dva dijagrama od kojih prvi prikazuje broj promjena kanala za mrežu s 10 i 20 aktivnih čvorova dok drugi dijagram prikazuje isto za mrežu s 30 i 40 aktivnih čvorova za scenarij s dva krajnja odredišta u mreži (slika 6.27).

Iz oba dijagrama može se zaključiti kako predloženi H-CLMC protokol ostvaruje najmanji broj promjena kanala, što predstavlja manji utrošak resursa. U usporedbi s inicijalnim CLMC protokolom može se vidjeti kako se povećanjem zagušenja u mreži (povećanje CQPS pokazatelja)



(a) N=10, 20 aktivnih čvorova



(b) N=30, 40 aktivnih čvorova

Slika 6.27. Broj promjena kanala u ovisnosti o CQPS za; C=2 krajnja odredišta

ne povećava broj promjena kanala, što je bio primarni problem CLMC metode. Također, ukupan broj promjena kanala puno je manji nego kod ostalih metoda i u području manjeg zagušenja gdje ACS metoda ostvaruje veliki broj promjena kanala.

Isto tako, potrebno je komentirati ponašanje CONTROL metode u slučaju povećanja broja čvorova. Iz usporednih dijagrama moguće je zaključiti kako sve metode slijede isti obrazac broja promjene kanala u ovisnosti o CQPS pokazatelju. Ukoliko se preklope prikazani dijagrami a) i b), točke na dijagramu se poklapaju za sve metode, osim za CONTROL metodu. Naime, kod CONTROL metode povećanjem broja čvorova u mreži povećava se broj promjena kanala, što ukazuje na problem skalabilnosti spomenute metode. U velikim mrežama ovo će rezultirati velikim brojem promjena kanala i samim time smanjenjem učinkovitosti mreže.

6.4.3. Pregled ukupnog poboljšanja kvalitete usluge za sve scenarije

Kako bi se definiralo poboljšanje kvalitete usluge u mreži predloženo je statističko vrednovanje poboljšanja predložene metoda, u usporedbi s osnovnim LWM protokolom. Zbog činjenice da za različito vrijeme T_{max} možemo uočiti da protokoli u usporedbi s osnovnim LWM protokolom imaju različite vrijednosti ne bi bilo zahvalno uzeti samo jednu točku za usporedbu. Zbog toga predložen je statistički način vrednovanja poboljšanja osnovnog LWM protokola kao omjer sume svih uspješnih upita predloženog protokola i sume svih uspješnih upita osnovnog LWM protokola kao:

$$P(\%) = \frac{K_{sum_{prot}} - K_{sum_{LWM}}}{K_{sum_{LWM}}} * 100\% \quad (6-15)$$

gdje je $K_{sum_{prot}}$ broj svih uspješnih upita za sve čvorove u mreži (za protokol *prot*) za sve vrijednosti

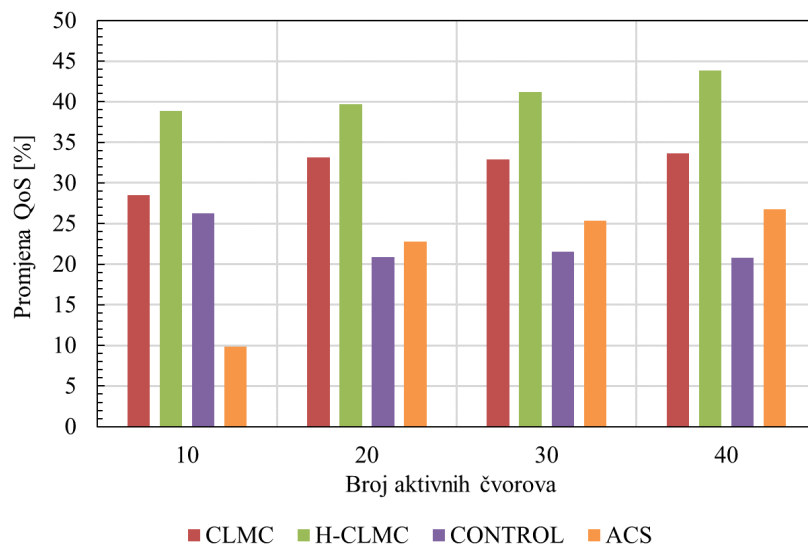
T_{max} unutar promatranog prozora. Tako možemo definirati i sljedeće:

$$K_{sum_{prot}} = \sum_{\forall T_{max} i=1}^N K_{i_{uspjesn}} \quad (6-16)$$

gdje je $K_{i_{uspjesn}}$ broj uspješno primljenih odgovora na ukupno K upita koje svaki i -ti čvor šalje prema krajnjem odredištu, a N je broj čvorova u mreži.

Definirana razlika predstavlja poboljšanje promatranog protokola u odnosu na osnovni LWM protokol u promatranom prozoru. Promatrani prozor odabran je kao vrijednosti do T_{max} za koji vjerojatnost uspješnog upita ne prelazi 90 %, što odgovara učestalo korištenom intervalu pouzdanosti u literaturi [135, 136]. Ovim se obuhvaća dio mreže gdje je najveće zagušenje i samim time se procjenjuje poboljšanje kvalitete usluge u najnepovoljnijim uvjetima mreže tj. kritičnom scenariju (engl. *worst-case scenario*).

Usporedni prikaz poboljšanja kvalitete usluge promatranih protokola komunikacije za različiti broj aktivnih čvorova u mreži prikazan je na slici 6.28.

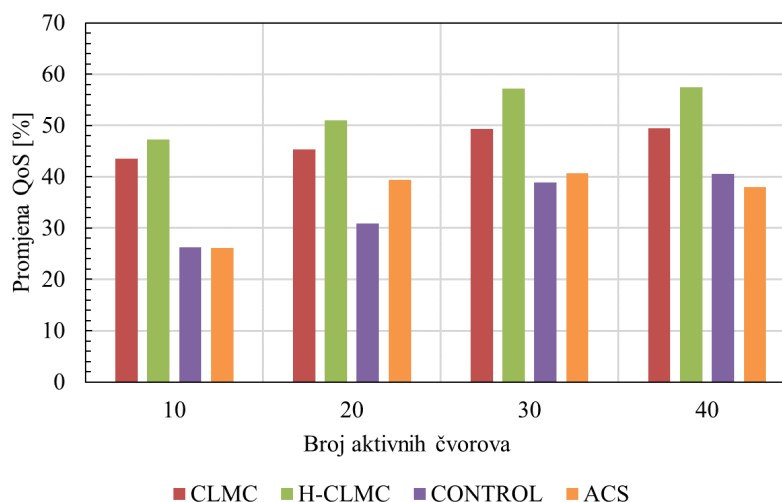


Slika 6.28. Poboljšanje kvalitete usluge u ovisnosti o broju aktivnih čvorova u mreži; C=2 krajnja odredišta

Prema pregledu poboljšanja kvalitete usluge za mrežu s dva krajnja odredišta i različitim brojem čvorova (slika 6.28) očito je kako predloženi H-CLMC protokol ostvaruje najveće poboljšanje kvalitete usluge u svim scenarijima. Bitno je uvidjeti kako se predloženi H-CLMC i CLMC protokol povećanjem broja aktivnih čvorova u mreži povećavaju i poboljšanje kvalitete usluge. Navedeno govori kako predloženi protokoli imaju dobru predispoziciju ispunjenja uvjeta skalabilnosti protokola. S druge strane, isto se ne može reći za CONTROL metodu koja pri povećanju broja aktivnih čvorova u mreži smanjuje poboljšanje kvalitete usluge. Ovo je i očekivano s obzirom da

ista s povećanjem broja čvorova povećava broj promjena kanala (opisano u prethodnom poglavlju 5).

Naposljetku, slika 6.29 prikazuje poboljšanje kvalitete usluge za predložene protokole, u scenariju s tri krajnja odredišta u mreži.



Slika 6.29. Poboljšanje kvalitete usluge u ovisnosti o broju aktivnih čvorova u mreži; C=3 krajnja odredišta

Kao i u prethodnom scenariju s dva krajnja odredišta u mreži, i u ovom scenariju predloženi H-CLMC protokol ostvaruje najveće poboljšanje kvalitete usluge u mreži. U usporedbi sa scenarijem s dva krajnja odredišta u mreži može se zaključiti kako se uvođenjem dodatnog kanala u mreži kvaliteta usluge povećala za prosječno 10 postotnih bodova (pp). Nadalje, situacija i u ovom scenariju ide u prilog predloženom H-CLMC protokolu jer se povećanjem broja aktivnih čvorova u mreži poboljšava kvaliteta usluge u svim scenarijima. Za ACS metodu može se zamijetiti maksimum poboljšanja koje dalje opada s povećanjem broja aktivnih čvorova u mreži. U slučaju CONTROL metode, u scenariju s tri krajnja odredišta u mreži ista pokazuje bolje performanse nego u scenariju sa dva krajnja odredišta te se povećanjem broja čvorova u ovom slučaju poboljšava kvaliteta usluge.

Ukoliko se promatraju oba predložena protokola (CLMC i H-CLMC) može se zaključiti kako oba rješenja ostvaruju bolje poboljšanje kvalitete usluge u usporedbi s rješenjima iz literature, u scenariju s jednim skokom. Zbog spomenutog vrednovanje predloženih protokola će se nastaviti u realnim mrežama s više skokova, u standardnim topologijama korištenim u literaturi.

6.5. Vrednovanje predloženog protokola u mrežama s više skokova

Kako bi se proučila primjenjivost predloženog rješenja u mrežama s više skokova napravljena je simulacija predloženog protokola u većim mrežama. Zbog činjenice da u ovakvim scenarijima postoji puno različitih parametara i topologija simulacija [137, 138, 139] postavlja se pitanje odabira optimalne topologije za vrednovanje protokola, sa strane gustoće postavljanja čvorova i veličine promatranog područja. Isto tako, postavlja se i pitanje odabira modela propagacije radijskog signala kako bi rezultati simulacije što bolje opisivali stvarnu situaciju.

6.5.1. Opis topologije i simulacijskog okruženja

Iz literature i članaka koji se temelje na predlaganju novih protokola i metoda jedna od najčešće korištenih topologija za vrednovanje performansi protokola komunikacije u bežičnim senzorskim (i aktorskim) mrežama je topologija rešetke (engl. *grid*) [140]. U spomenutoj topologiji, čvorovi se postavljaju u formaciju sa i redaka i j stupaca gdje je najčešće $i = j = a$ te je broj postavljenih čvorova u mreži $N = a^2$. Nadalje, vrlo je bitno definirati veličinu promatranog područja, tj. gustoću postavljanja čvorova. Iz literature i objavljenih članaka koji se temelje na predlaganju novih protokola i vrednovanje istih najčešće korišteni parametri uključuju područje postavljanja čvorova veličine 100m x 100m te radijus dosega čvora od 40 m [48, 111, 112]. Zbog spomenutoga, ista topologija je preuzeta u ovoj disertaciji.

Jedna od najčešćih pretpostavki je da svi čvorovi u mreži imaju svojstvo usmjeravanja podataka, što u nekim slučajevima nije primjenljivo. U slučaju vrednovanja višekanalnih protokola potrebno je definirati koji čvorovi imaju funkcionalnost usmjeravanja kako bi se odvojili od ostalih čvorova. Kako je predloženo u [21, 22, 23] moguće je postavljanje dodatnih čvorova u mreži koji obavljaju funkcionalnost usmjeravanja tako da je njihova gustoća veća u središtu mreže (kod krajnjeg odredišta). No postavlja se pitanje broja usmjerivačkih čvorova, tj. koliki je broj usmjerivačkih čvorova u mreži u odnosu na senzorske i aktorske čvorove.

Zbog spomenutog u okviru ove disertacije definiran je udio usmjerivača u mreži kao omjer broja usmjerivačkih čvorova i ostalih čvorova u mreži:

$$\lambda = \frac{N_r}{N} \quad (6-17)$$

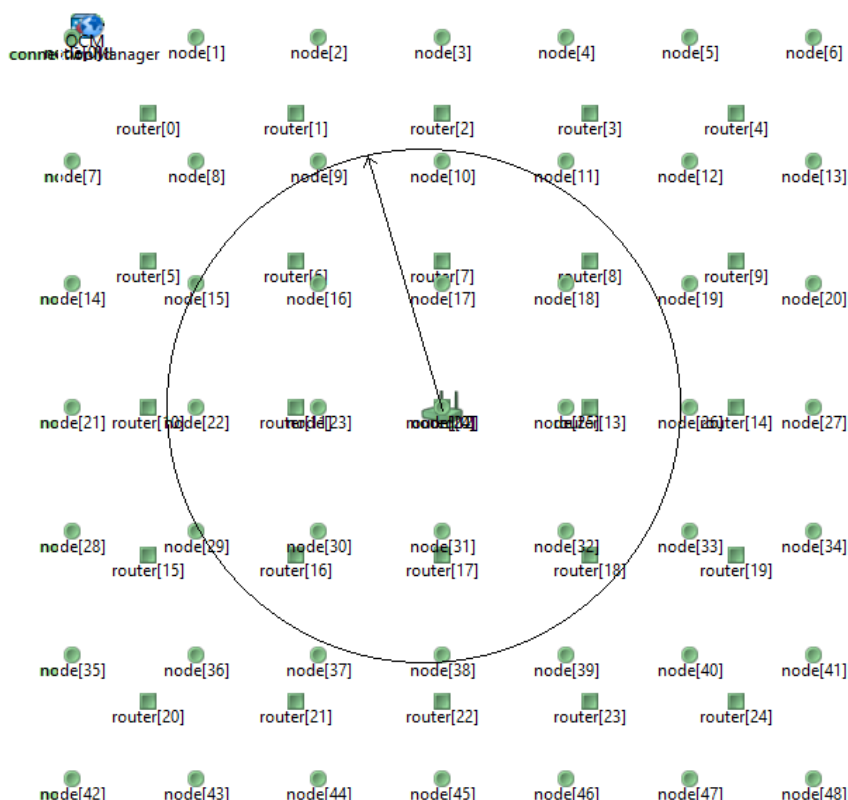
gdje je N_r broj usmjerivačkih čvorova u mreži a N broj ostalih čvorova u mreži.

Zbog činjenice da u okviru ove disertacije nije stavljen naglasak na protokol usmjeravanja i

više kanalnu arhitekturu, uzorom na statičnu konfiguraciju mreže predloženu u [106] u okviru ove simulacije za sve predložene metode i protokole predložen je sljedeći simulacijski okvir:

- Usmjerivački čvorovi su statični i ne mijenjaju kanale.
- Kanal usmjerivačkog čvora definiran je pri inicijalizaciji mreže i svaki usmjerivački čvor odabire kanal nasumično iz dostupnih kanala (cijeli broj u području $[0, C - 1]$, gdje je C broj krajnjih odredišta u mreži/broj kanala).
- Čvorovi se postavljaju u topologiju rešetke i za svaku mrežu definiran je udio usmjerivača λ
- Sve metrike kvalitete usluge računate su samo za čvorove, ne uzimajući u obzir usmjerivače.
- Svi čvorovi u mreži implementiraju predložene metode, dok samo senzorski/aktorski čvorovi imaju sposobnost promjene kanala.
- Svi čvorovi, osim usmjerivačkih čvorova, su aktivni čvorovi (šalju upite).

Izgled topologije prikazan je na slici 6.30 gdje su čvorovi označeni kao pravokutnik usmjerivački čvorovi, čvorovi označeni s krugom senzorski/aktorski čvorovi te se u središtu mreže nalaze krajnja odredišta. Crnom kružnicom označen je radijus komunikacije čvora (jednak za sve čvorove u mreži).



Slika 6.30. Topologija BSAM za vrednovanje predloženog protokola u mreži s više skokova u simulacijskom alatu OMNeT++ (25 usmjerivača, 50 čvorova)

U predloženoj topologiji napravljeno je vrednovanje predloženih protokola u okviru poboljšanja kvalitete usluge promatrajući metrike vjerojatnosti uspješnog upita i vremena odziva za scenarij od 50 i 100 čvorova. Rezultati su prikazani u sljedećim potpoglavljima. Korišteni simulator je OMNeT++ te su parametri simulacije i simulacijski modeli jednaki kao u prethodnom poglavlju, što je detaljno opisano u poglavlju 4.4.2.

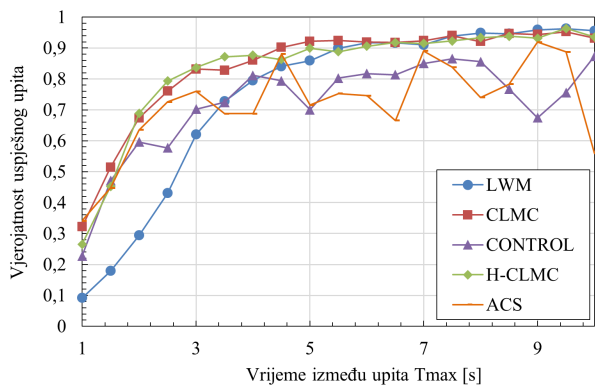
6.5.2. Scenarij s 50 aktivnih čvorova

U prvom scenariju analizirana je topologija mreže s 50 čvorova, od kojih su svi čvorovi aktivni. Aspekt kvalitete usluge promatran je kroz vjerojatnost uspješnog upita i vrijeme odziva, za različite vrijednosti udjela usmjerivača u mreži ($\lambda = 0,16$ do $0,5$) te broja krajnjih odredišta u mreži ($C = 2$ do 4). Isto tako, promatrana je učinkovitost protokola s obzirom na broj promjena kanala. Iskazane vrijednosti prikazuju poboljšanje kvalitete usluge prema jednadžbi (6-15).

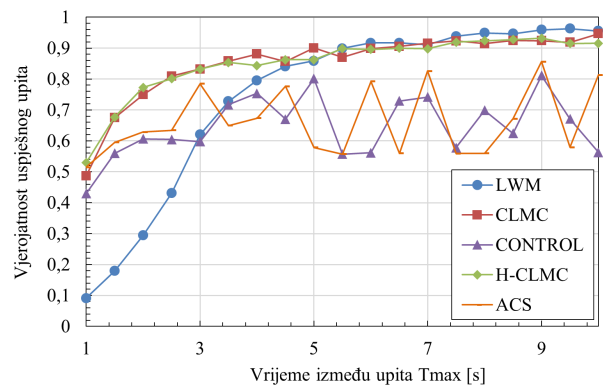
U prvom scenariju promatrana je mreža sa $\lambda = 0,16$, tj. sa samo 8 usmjerivača u cijeloj mreži. Cilj ovog scenarija je vrednovanje performansi protokola u situacijama kad mreža nije potpuna nego postoji granična povezanost mreže. U slučaju višekanalne arhitekture ovaj problem povezanosti se dodatno povećava jer se broj usmjerivača dijeli po svakom kanalu. Tako, na primjer, za spomenuti scenarij i $C = 2$ krajnja odredišta u mreži efektivni broj usmjerivača u mreži je $N_r/C = 4$ dok u scenariju sa 4 krajnja odredišta imamo efektivno samo 2 usmjerivača u mreži. U spomenutim okolnostima pojavljuju se odvojeni otoci u mreži na različitim kanalima i zadatak višekanalnog protokola jest detektiranje nepovezanosti mreže i odlučivanje o komunikaciji na točnom kanalu.

Prvi dio simulacija obuhvaća detaljni prikaz ponašanja mreže dok će se u drugom dijelu simulacija prikazivati ukupno poboljšanje kvalitete usluge prije definiranom metrikom. Na slici 6.31 prikazan je dijagram vjerojatnosti uspješnog upita za dva i tri krajnja odredišta u mreži i udio usmjerivača od $\lambda = 0,16$ (8 usmjerivača u mreži).

Prema dijagramu na slici 6.31a u scenariju s dva krajnja odredišta u mreži očito je kako predloženi H-CLMC protokol ostvaruje najbolje performanse, tj. najveću kvalitetu usluge, dok je inicijalni CLMC protokol vrlo blizu po performansama. Također, može se zaključiti kako oba protokola u svim rasponima T_{max} ostvaruju poboljšanje u odnosu na temeljni LWM protokol. S druge strane, metode CONTROL i ACS se susreću sa problemom uspostave kvalitete usluge za veće vrijednosti T_{max} , gdje se događa neželjeni učinak degradacija performansi mreže (nakon vrijednosti $T_{max} > 3,5$ s). Glavni razlog leži u činjenici kako spomenute metode nisu prilagođene za rad u uvjetima kada je mreža granično povezana. Kako CONTROL metoda ovisi o informacijama



(a) $C = 2$ krajnja odredišta u mreži



(b) $C = 3$ krajnja odredišta u mreži

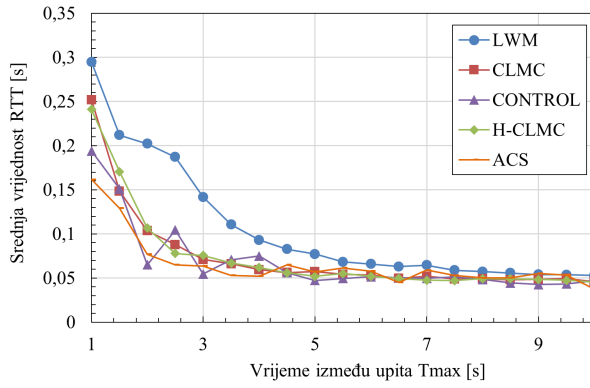
Slika 6.31. Vjerojatnost uspješnog upita u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=50$ aktivnih čvorova, udio usmjerivača u mreži $\lambda=0,16$

susjednih čvorova tj. broju uspješnih upita, u segmentima mreže gdje nema dovoljno susjednih čvorova na trenutnom kanalu nije moguće dobiti povratnu informaciju o zagušenju mreže, stoga nije moguće odlučiti o promjeni kanala. Slična situacija se događa i s ACS metodom koja koristi srednju vrijednost zauzeća kanala. Zbog spomenutog predloženi protokoli CLMC i H-CLMC koriste izravnu informaciju u komunikaciji s odredišnim čvorom i na temelju te informacije mogu smanjiti korištenje kanala na kojima nema dovoljne povezanosti mreže.

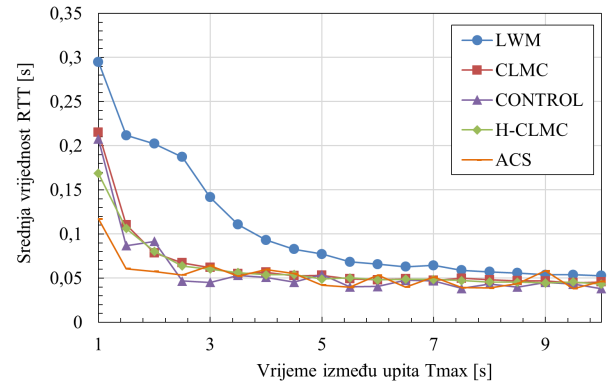
Slična se situacija može uočiti za slučaj sa tri krajnja odredišta u mreži (slika 6.31b gdje je još jače izražen problem odvojenih otoka na različitim kanalima. Prema spomenutom dijagramu ACS i CONTROL metode povećanjem broja krajnjih odredišta u mreži još više degradiraju performanse mreže te se može uočiti kako spomenute metode nikako nisu primjenjive za granično povezane mreže. Isto tako, zbog jako rijetke povezanosti mreže čak i predloženi H-CLMC i CLMC u određenim uvjetima mogu rezultirati minimalnim degradacijama performansi (do 5 %).

Ukoliko se isto razmatra s aspekta vremena odziva u mreži (slika 6.32) može se zaključiti kako svi razmatrani protokoli i metode ostvaruju smanjenje vremena odziva i samim time poboljšanje kvalitete usluge. Ovaj učinak je izraženiji kod većeg broja krajnjih odredišta u mreži, što se može pripisati distribuciji opterećenja mreže na više krajnjih odredišta.

Iz dijagrama vremena odziva može se zaključiti kako ACS metoda ostvaruje najmanje vrijeme odziva, ali ostvaruje i najmanju vjerojatnost uspješnog upita, što ne opravdava dobre performanse vremena odziva. S druge strane, protokoli H-CLMC i CLMC ostvaruju nešto veće vrijednosti vremena odziva dok i dalje ostvaruju smanjenje vremena odziva u usporedbi s osnovnim LWM protokolom. Uz povećanje vjerojatnosti uspješnog upita za ove protokole dobiva se poboljšanje kvalitetom usluge kao krajnji rezultat.



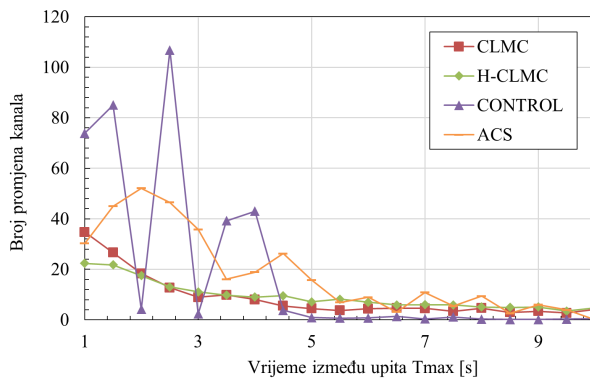
(a) $C = 2$ krajnja odredišta u mreži



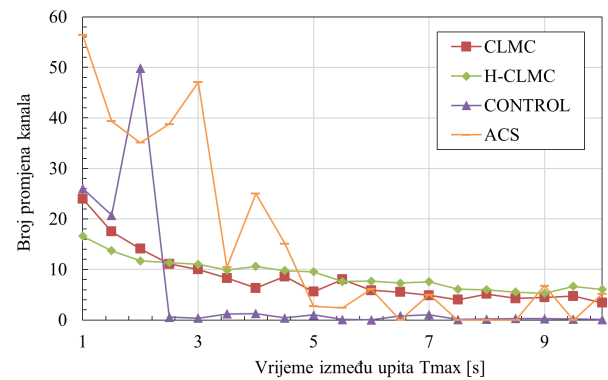
(b) $C = 3$ krajnja odredišta u mreži

Slika 6.32. Srednje vrijeme odziva u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=50$ aktivnih čvorova, udio usmjerivača u mreži $\lambda=0,16$

Naposljetku, za razmatrani scenarij granične povezanosti mreže analiziran je broj promjena kanala za sve predložene protokole i metode. Dijagram broja promjena kanala prikazan je na slici 6.33.



(a) $C = 2$ krajnja odredišta u mreži



(b) $C = 3$ krajnja odredišta u mreži

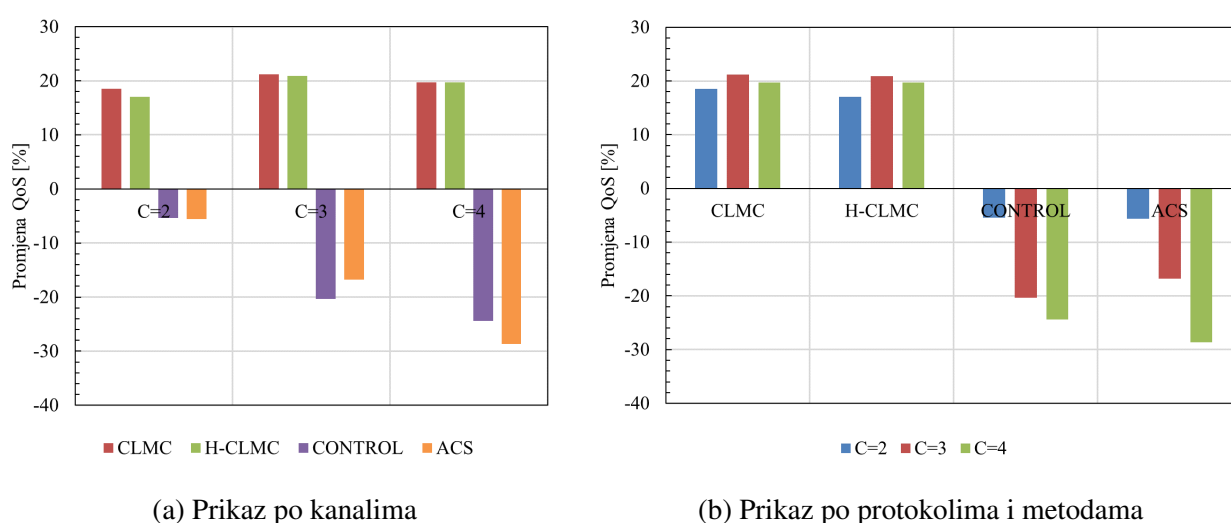
Slika 6.33. Broj promjena kanala u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=50$ aktivnih čvorova, udio usmjerivača u mreži $\lambda=0,16$

Prema dijagramu za dva krajnja odredišta u mreži (slika 6.33a) evidentno je kako metode ACS i CONTROL ostvaruju puno veći broj promjena kanala, u odnosu na ostale metode (osobito u području većeg zagušenja mreže, u ovom slučaju $T_{max} \leq 5$ s), gdje predloženi protokoli H-CLMC i CLMC ostvaruju najmanji broj promjena kanala. Slična situacija se može zamijetiti i u slučaju s tri krajnja odredišta u mreži (slika 6.33b). Treba napomenuti kako CONTROL metoda ostvaruje manji broj promjena kanala u slučaju većeg broja krajnjih odredišta (kanala) u mreži. Razlog je vrlo mali broj susjednih čvorova na istom kanalu koji odašilju informaciju o stanju kanala. Rezultat je degradacija performansi mreže, gdje se navedeni mali broj promjena kanala ne

može smatrati pozitivnom vrijednosti.

Na temelju izloženog moguće je zaključiti kako predloženi protokoli CLMC i H-CLMC ostvaruju poboljšanje kvalitete usluge čak i u uvjetima granične povezanosti mreže. Kako bi se detaljno ispitalo poboljšanje performansi predloženih protokola u usporedbi s rješenjima iz literature, za različite kombinacije udjela usmjerivača u mreži i različiti broj kanala (krajnjih odredišta) određene su vrijednosti promjene kvalitete usluge, u odnosu na osnovni LWM protokol.

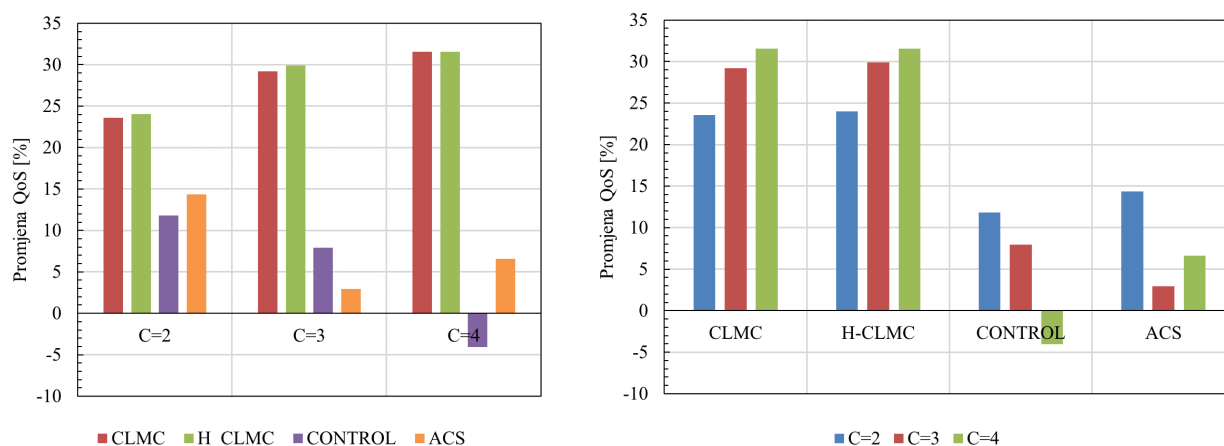
Ukupni rezultati promjene kvalitete usluge za prethodno detaljno opisane scenarije (uz dodatak scenarija sa četiri krajnja odredišta u mreži), za udio usmjerivača u mreži $\lambda = 0,16$ prikazani su na slici 6.34.



Slika 6.34. Promjena kvalitete usluge za različite vrijednosti broja krajnjih odredišta C ; udio usmjerivača u mreži $\lambda=0,16$, $N=50$ aktivnih čvorova

Na slici se vidi poboljšanje kvalitete usluge za različite vrijednosti broja krajnjih odredišta/kanal u mreži (slika 6.34a) te grupirano po promatranim protokolima i metodama (slika 6.34b). Ukoliko se promatra promjena kvalitete usluge sa strane različitog broja kanala u mreži (krajnjih odredišta), slika 6.34a, može se zaključiti kako u predloženom scenariju s udjelom usmjerivača od $\lambda = 0,16$ metode CONTROL i ACS uzrokuju degradaciju performansi pri povećanju broja kanala. Isto tako, kao što je prije opisano, CLMC i H-CLMC ostvaruju poboljšanje performansi koje se povećava s brojem kanala, no ipak za tri kanala u mreži postiže maksimum poboljšanja kvalitete usluge u iznosu od 20,5 %. U usporedbi po protokolima, slika 6.34b, može se zaključiti kako CLMC i H-CLMC ostvaruju vrlo slične performanse te čak u nekim slučajima inicijalni CLMC ostvaruje bolje performanse. Tome je zaslužan veći broj promjena kanala kod CLMC protokola koji u spomenutoj graničnoj povezanosti mreže može brže promijeniti kanal i na temelju toga ostvariti nešto veću kvalitetu usluge.

U sljedećem scenariju razmatra se udio usmjerivača u mreži od $\lambda = 0,24$ (ili 12 usmjerivača). Rezultati poboljšanja kvalitete usluge prikazani su na slici 6.35.

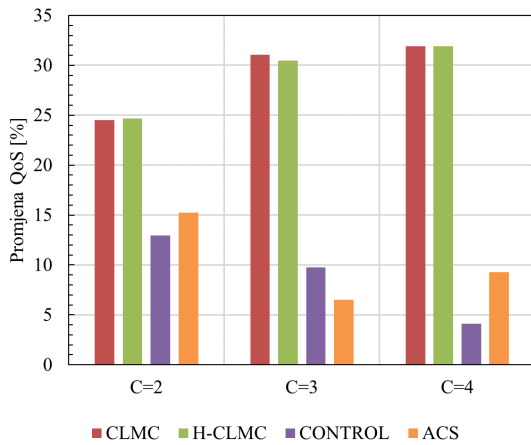


Slika 6.35. Poboljšanje kvalitete usluge za različite vrijednosti broja krajnjih odredišta C ; udio usmjerivača u mreži $\lambda=0,24$, $N= 50$ aktivnih čvorova

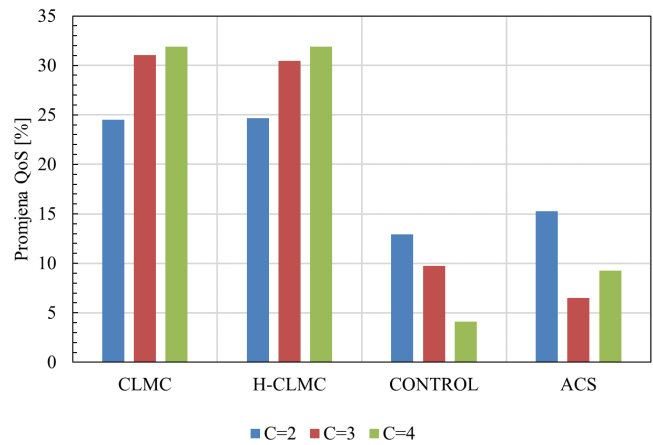
Kao što je prikazano na slici 6.35a za različite vrijednosti broja kanala u mreži može se zaključiti kako predloženi CLMC i H-CLMC protokoli ostvaruju najveće poboljšanje kvalitete usluge te se povećanjem broja kanala u mreži poboljšava kvaliteta usluge. Nadalje, očita je značajna razlika između dva predložena protokola i ostalih rješenja, dok razlika između samih CLMC i H-CLMC protokola nije značajna. Ovdje se uviđa kako H-CLMC protokol ostvaruje neznatno bolje performanse od CLMC protokola, dok se povećanjem broja kanala oni izjednačuju. Za razliku od prošlog scenarija s $\lambda = 0,16$ u ovom scenariju protokoli H-CLMC i CLMC ostvaruju maksimalno poboljšanje kvalitete usluge od 30 %. Naposljetku, može se zaključiti kako ni CONTROL ni ACS metoda ne daju dobre rezultate pri povećavanju broja kanala zbog prije spomenute pojave odvojenih otoka u mreži i problema brze promjene kanala.

Nakon opisanih scenarija granične povezanosti mreže potrebno je ispitati kako se promatrana rješenja ponašaju u mrežama koje imaju dobru povezanost s aspekta udjela usmjerivača u višekanalnoj arhitekturi. Stoga, na slici 6.36 prikazan je scenarij koji uključuje udio usmjerivača od $\lambda = 0,32$, tj. 16 usmjerivača u mreži.

U ovom scenariju čak i u slučaju s četiri krajnja odredišta u mreži postoji prosječno 4 usmjerivača po kanalu, čime se ostvaruje velika vjerojatnost potpune povezanosti mreže. Prema dijagramu na slici 6.36a očito je kako predloženi H-CLMC i CLMC protokoli ostvaruju najveće poboljšanje kvalitete usluge, dok CONTROL i ACS ostvaruju nešto lošije performanse. Nadalje, uočava se isti problem kao i u prethodnim scenarijima za ACS i CONTROL metode koje povećanjem broja kraj-



(a) Prikaz po kanalima

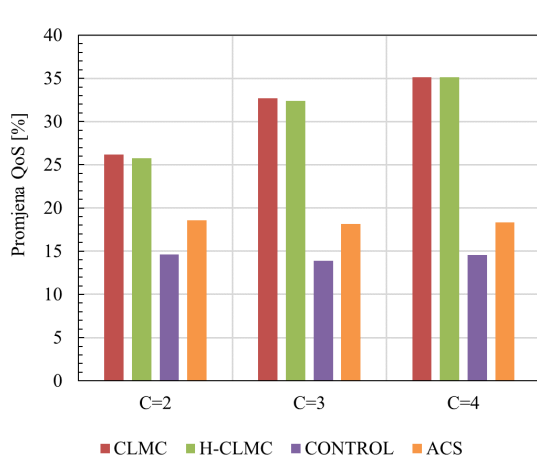


(b) Prikaz po protokolima i metodama

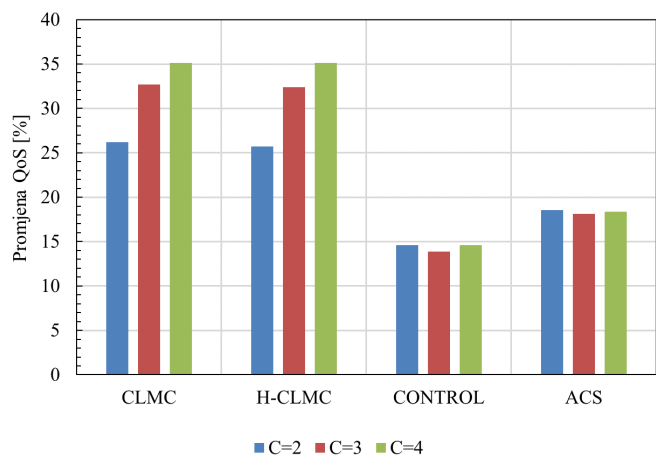
Slika 6.36. Poboljšanje kvalitete usluge za različite vrijednosti broja krajnjih odredišta C ; udio usmjerivača u mreži $\lambda=0,32$, $N= 50$ aktivnih čvorova

njih odredišta u mreži ostvaruju degradaciju performansi. Predloženi H-CLMC i CLMC protokoli i dalje ostvaruju bolje performanse pri povećanju broja kanala u mreži te se i u ovom slučaju može komentirati vrlo mala razlika između predložena dva protokola.

Naposljetku, posljednji scenarij obuhvaća udio usmjerivača u mreži od $\lambda = 0,50$, što predlaže da je u mreži 25 usmjerivačkih čvorova. Rezultati simulacije za ovaj scenarij prikazani su na slici 6.37.



(a) Prikaz po kanalima



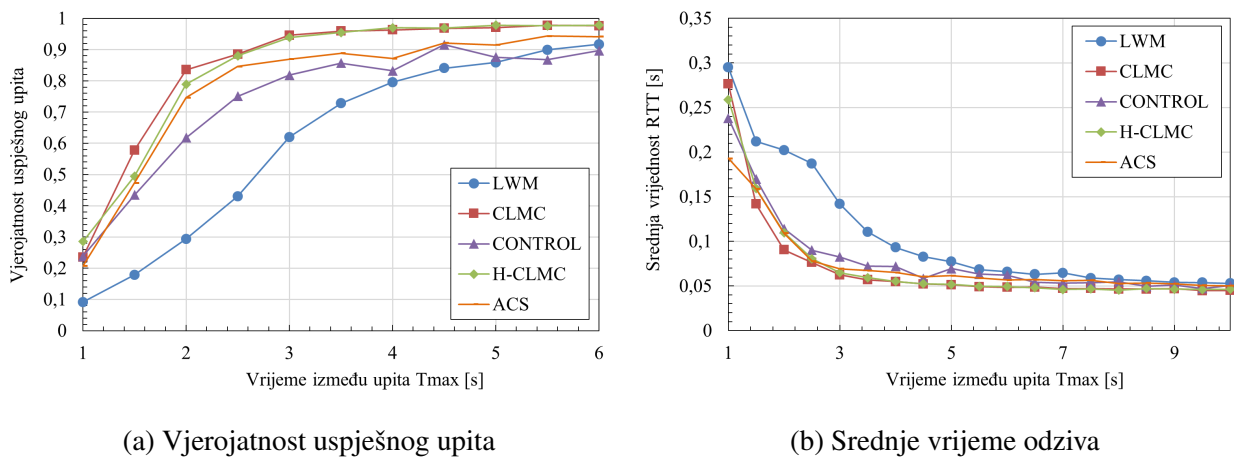
(b) Prikaz po protokolima i metodama

Slika 6.37. Poboljšanje kvalitete usluge za različite vrijednosti broja krajnjih odredišta C ; udio usmjerivača u mreži $\lambda=0,50$, $N= 50$ aktivnih čvorova

U ovom scenariju može se zaključiti kako postoji dovoljan broj usmjerivača te da je mreža potpuno povezana čak i u situaciji sa 4 krajnja odredišta (kanala= u mreži $(25/4 = 6,25)$ usmj./kanalu) Iz slike 6.37a može se uvidjeti kako predloženi H-CLMC protokol ostvaruje maksimalno poboljša-

nje kvalitete usluge od 35 % za situaciju sa 4 kanala u mreži te se može vidjeti kako se povećanjem broja kanala poboljšanje povećava. S druge strane, metode ACS i CONTROL u ovom slučaju ostvaruju dobre performanse (čak i za veći broj kanala u mreži) no ne odlikuju se povećanjem kvalitete usluge u slučaju povećanja kanala u mreži, što bi trebala biti najveća prednost višekanalnih protokola.

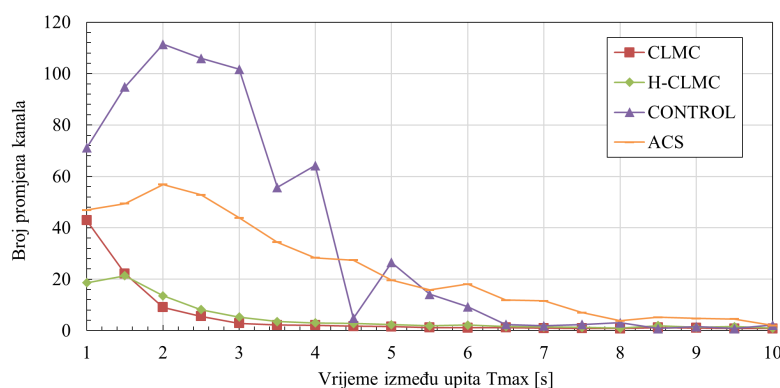
Naposljetku, za slučaj dobre povezanosti mreže (udio usmjerivača u mreži $\lambda = 0,50$) izdvojen je slučaj s dva krajnja odredišta u mreži za detaljnu analizu i vrednovanje predloženih rješenja (slika 6.38).



Slika 6.38. Vjerojatnost uspješnog upita i vrijeme odziva ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=50$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, udio usmjerivača u mreži $\lambda=0,50$

Prema slici 6.38a može se zaključiti kako u ovom slučaju inicijalno predloženi CLMC protokol ostvaruje najbolje performanse, dok H-CLMC ostvaruje gotovo identične performanse s obzirom na vjerojatnost uspješnog upita. Nadalje, u ovom scenariju ACS metoda postiže iznimno dobre rezultate koji su vrlo blizu CLMC i H-CLMC protokola u području većeg zagušenja mreže (u ovom slučaju za $T_{max} < 3$ s), dok u uvjetima manjeg zagušenja i CONTROL i ACS imaju nešto lošije performanse te ostvaruju manju vjerojatnost uspješnog upita. Sa strane vremena odziva (slika 6.38b) može se zaključiti kako sva rješenja ostvaruju smanjenje vremena odziva ispod vrijednosti osnovnog LWM protokola. Isto tako, ne uočava se značajna razlika u vremenu odziva između analiziranih metoda i protokola. Nešto manje vrijednosti vremena odziva ipak ostvaruju predloženi protokoli CLMC i H-CLMC u području manjeg zagušenja mreže.

Naposljetku ove analize potrebno je istaknuti i čimbenik učinkovitosti višekanalnog protokola s aspekta broja promjene kanala za svaki čvor. Pa tako, za spomenuti scenarij na slici 6.39 prikazana je srednja vrijednost broja promjena kanala za čvorove u mreži.



Slika 6.39. Broj promjena kanala u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=50$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, udio usmjerivača u mreži $\lambda=0,50$

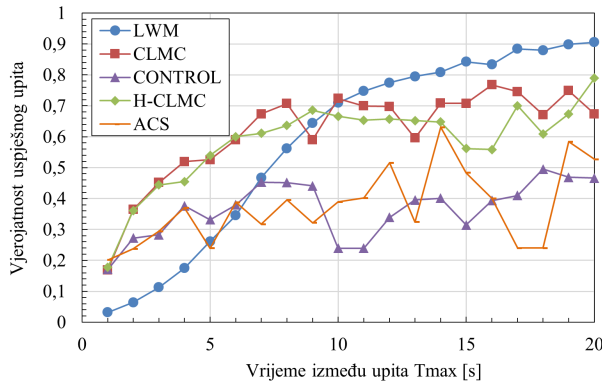
Iz prikazanog dijagrama može se zaključiti kako H-CLMC i CLMC protokoli ostvaruju najmanji broj promjena kanala, čime se ostvaruje učinkovitost protokola minimizacijom potrošnje energije i smanjuje zagađenja RF spektra čestim promjenama kanala. I u ovom slučaju uviđa se kako CONTROL metoda ostvaruje relativno velik broj promjena kanala, dok ACS metoda zadržava broj promjena kanala relativno konstantnim u širem području, čime ostvaruje vrlo dobru kvalitetu usluge.

6.5.3. Scenarij sa 100 aktivnih čvorova

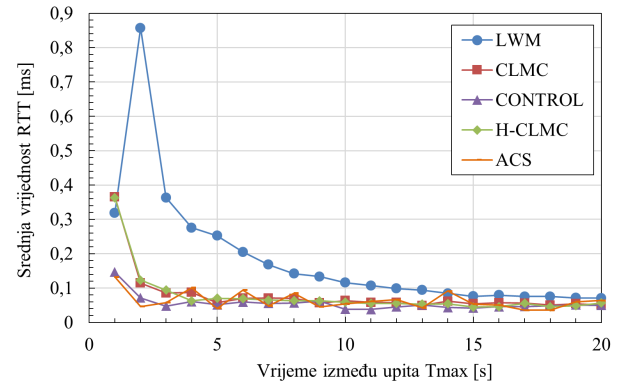
Zadnji dio vrednovanja predloženih rješenja obuhvaća scenarij u mreži sa 100 čvorova, koji predstavlja granicu s velikim mrežama [24]. U ovom scenariju (kao i u prethodnom) svi čvorovi su aktivni i ostvaruje se jednaka gustoća čvorova po m^2 kao i u prethodnom scenariju sa 50 čvorova. Isto tako, domet čvora je također jednak kao i u prethodnim scenarijima. Na isti način je analizirano poboljšanje kvalitete usluge te pojedinačno vrednovanje vremena odziva i vjerojatnosti uspješnog upita za kritične uvjete u mreži.

U prvom dijelu analiziran je granični scenarij s udjelom usmjerivača od $\lambda = 0,16$ (granična povezanost) i tri krajnja odredišta u mreži te su rezultati za vjerojatnost uspješnog upita prikazani na slici 6.40a.

Prema dijagramu vjerojatnosti uspješnog upita očito je kako u većim mrežama za slučaj granične povezanosti mreže i tri odredišta u mreži niti jedan od predloženih protokola ne ostvaruje poboljšanje performansi, nego baš suprotno - degradaciju. Degradacija performansi u ovom scenariju izrazito je izražena za ACS i CONTROL metode. Za predložene protokole CLMC i H-CLMC degradacija je izražena u slučaju slabijeg zagušenja mreže (u ovom slučaju za $T_{max} > 10$ s). Ovaj problem nastaje zbog odvojenih otoka u mreži, pri čemu se događa da neki dijelovi mreže



(a) Vjerojatnost uspješnog upita



(b) Srednje vrijeme odziva

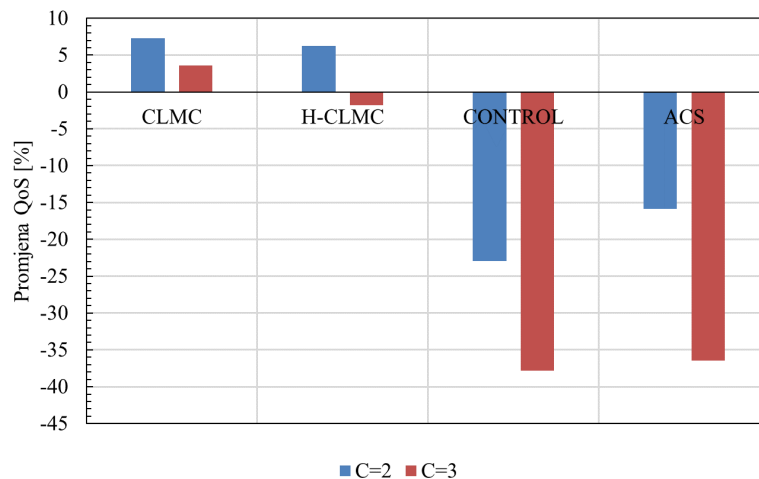
Slika 6.40. Vjerojatnost uspješnog upita i vrijeme odziva ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=100$ aktivnih čvorova, $C=3$ krajnja odredišta, udio usmjerivača u mreži $\lambda=0,16$

moгу komunicirati samo na jednom kanalu, dok ostali kanali nisu dostupni. U tim slučajevima CONTROL i ACS metode ne mogu pravovremeno promijeniti kanal te se pojavljuje višekanalni problem skrivenog čvora. Kod CLMC i H-CLMC isti problem postaje razlog degradacije performansi, no sa smanjenim utjecajem, zbog činjenice da predloženi protokoli mogu učinkovitije reagirati na višekanalni problem skrivenog čvora, detekcijom izostale potvrde na mrežnom sloju (MAC ACK).

Što se tiče vremena odziva u spomenutom scenariju, iako niti jedno rješenje ne poboljšava vjerojatnost uspješnog upita sva rješenja smanjuju vrijeme odziva, u odnosu na osnovni LWM protokol (slika 6.40b). Najmanje vrijeme odziva ostvaruju metode CONTROL i ACS, no iste ostvaruju i najmanju vjerojatnost uspješnog upita, stoga se ovo smanjenje u odnosu na ostale protokole ne može smatrati kao prednost.

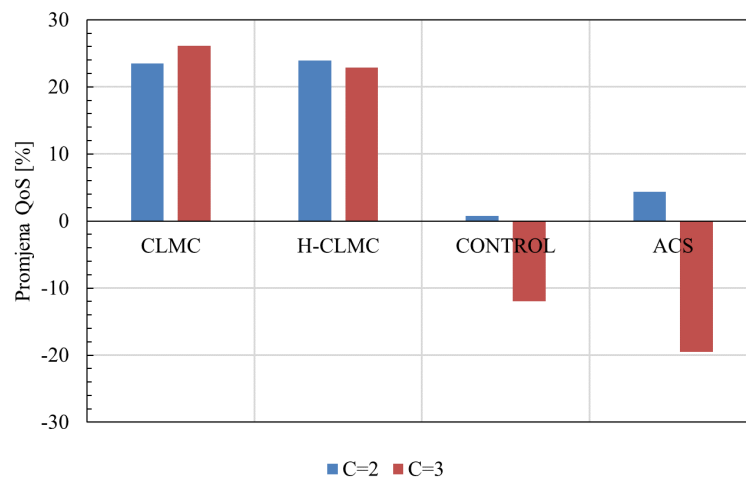
Kao i u scenariju s 50 aktivnih čvorova u mreži i u ovom scenariju analizirati će se ukupna promjena kvalitete usluge za promatrani raspon vremena T_{max} , prema jednadžbi (6-15). U ovom scenariju analizirana je promjena kvalitete usluge za dva i tri krajnja odredišta u mreži.

Na slici 6.41 prikazan je granični slučaj povezanosti s udjelom usmjerivača od $\lambda = 0,16$. Prema priloženom dijagramu može se zaključiti kako niti jedno rješenje ne ostvaruje značajno poboljšanje kvalitete usluge, naprotiv, dolazi do degradacije kvalitete usluge u odnosu na osnovni LWM protokol. Za predložene protokole H-CLMC i CLMC može se uočiti kako postoji minimalno poboljšanje kvalitete usluge za slučaj sa dva kanala, dok se povećanjem broja kanala to poboljšanje smanjuje. Ovdje je moguće definirati granični slučaj za CLMC i H-CLMC protokol, gdje broj usmjerivača nije dovoljan u ovisnosti o broju čvorova u mreži i veličini mreže kako bi se ostvarilo poboljšanje kvalitete usluge.



Slika 6.41. Promjena kvalitete usluge za različite protokole i vrijednosti broja krajnjih odredišta C ; udio usmjerivača u mreži $\lambda=0,16$, $N=100$ aktivnih čvorova

Povećanjem broja usmjerivača u mreži može se pretpostaviti povećanje kvalitete usluge za sva predložena rješenja. Za udio usmjerivača od $\lambda = 0,24$ (slika 6.42) prikazuje poboljšanje kvalitete usluge.

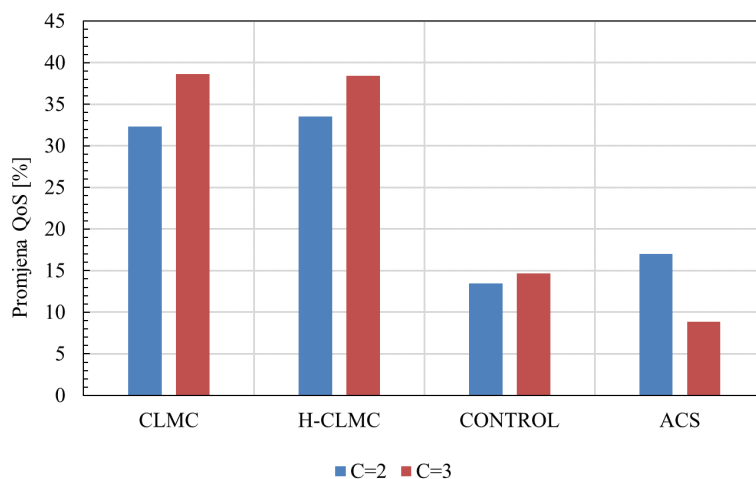


Slika 6.42. Promjena kvalitete usluge za različite protokole i vrijednosti broja krajnjih odredišta C ; udio usmjerivača u mreži $\lambda=0,24$, $N=100$ aktivnih čvorova

U ovom slučaju prema dijagramu na slici može se zaključiti kako u ovom scenariju predloženi protokoli H-CLMC i CLMC ostvaruju najveće poboljšanje kvalitete usluge, dok sva ostala rješenja i dalje uzrokuju degradaciju kvalitete usluge, u usporedbi s osnovnim LWM protokolom. Isto tako, očito je da se kod inicijalnog CLMC protokola povećanjem broja kanala poboljšava kvaliteta usluge, dok H-CLMC ostvaruje nešto manje poboljšanje kvalitete usluge. Razlog je veći broj promjena kanala za CLMC protokol što u mreži s graničnom povezanosti rezultira u boljim

performansama za čvorove koji se nalaze u situaciji sa ograničenim brojem vidljivih kanala.

Povećanjem broja usmjerivača u mreži uviđa se dodatno poboljšanje kvalitete usluge za protokole H-CLMC i CLMC, dok ostala rješenja prelaze kritičnu točku te se i kod njih počinje ostvarivati poboljšanje kvalitete usluge (slika 6.43).



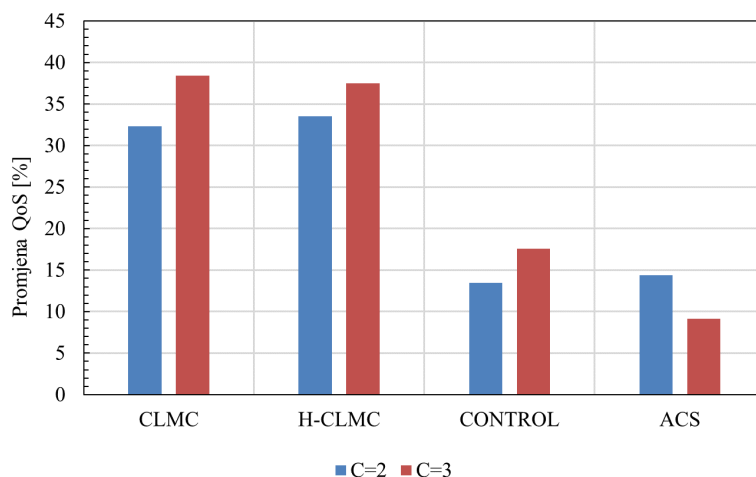
Slika 6.43. Promjena kvalitete usluge za različite protokole i vrijednosti broja krajnjih odredišta C ; udio usmjerivača u mreži $\lambda=0,32$, $N = 100$ aktivnih čvorova

Za slučaj od $\lambda = 0,32$ predloženi CLMC i H-CLMC protokoli ostvaruju poboljšanje kvalitete usluge od 32 % za slučaj s dva krajnja odredišta u mreži i 38 % za slučaj od tri odredišta u mreži. Ostala rješenja CONTROL i ACS ostvaruju poboljšanja u rasponu od 9 % do 17 % gdje se uviđa kako CONTROL metoda bolje reagira na povećanje broja kanala u mreži, dok ACS metoda i dalje povećanjem broja kanala uzrokuje smanjenje kvalitete usluge u mreži.

Naposljetku, analiziran je posljednji scenarij s udjelom usmjerivača od $\lambda = 0,5$ čime se uvodi 50 usmjerivača u mrežu i ostvaruje potpuna povezanost i u uvjetima kada u mreži postoje tri kanala. Rezultati promjene kvalitete usluge prikazani su na slici 6.44.

U ovom slučaju mreža je potpuno povezana te se može ocijeniti poboljšanje kvalitete usluge za sva rješenja. Kako prikazuje dijagram na slici može se zaključiti kako sva razmatrana rješenja ostvaruju poboljšanje kvalitete usluge, H-CLMC i CLMC ostvaruju najveće poboljšanje kvalitete usluge, u rasponu od 32 % do 38 %. U slučaju dva kanala u mreži može se zaključiti kako H-CLMC ostvaruje bolje performanse, dok za slučaj od tri kanala CLMC ostvaruje veću kvalitetu usluge.

Ukoliko se predloženi protokoli usporede sa strane vjerojatnosti uspješnog upita i vremena odziva (slika 6.45) očito je kako oba protokola ostvaruju gotovo jednake performanse vjerojatnosti uspješnog upita. Nadalje, ukoliko se usporede s CONTROL i ACS metodama evidentno je kako



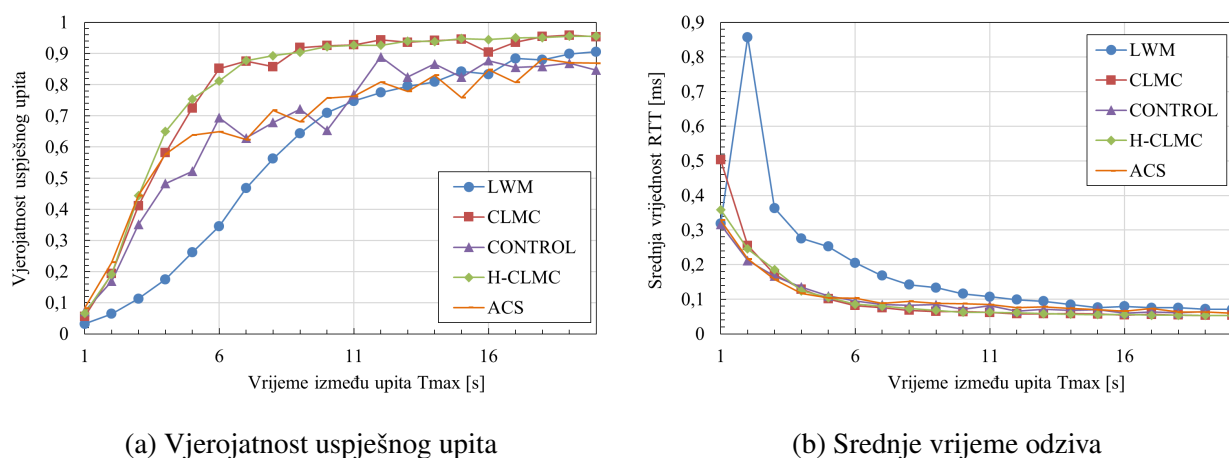
Slika 6.44. Promjena kvalitete usluge za različite protokole i vrijednosti broja krajnjih odredišta C ; udio usmjerivača u mreži $\lambda=0,50$, $N=100$ aktivnih čvorova

CLMC i H-CLMC ostvaruju značajno bolje performanse u području kad mreža nije u području jakog zagušenja (u ovom slučaju za $T_{max} > 5$ s).

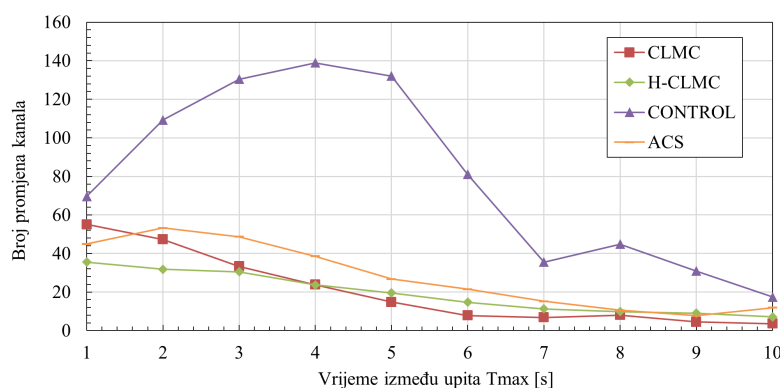
Ukoliko se razmotri vrijeme odziva u ovom scenariju (slika 6.45b) može se zaključiti kako sva rješenja ostvaruju smanjenje vremena odziva u usporedbi s osnovnim LWM protokolom, dok ipak H-CLMC ostvaruje manje vrijednosti vremena odziva u usporedbi s CLMC protokolom.

Naposljetku, razmotren je prosječan broj promjena kanala po čvoru za promatrana rješenja protokola i metoda. Spomenuti dijagram prikazan je na slici 6.46.

Prema spomenutom dijagramu broja promjene kanala može se zaključiti kako CONTROL metoda ostvaruje najveći broj promjena kanala te samim time predstavlja najmanje učinkovitu metodu sa strane učinkovitosti višekanalnog protokola. Ukoliko se usporede ACS i predložene CLMC i



Slika 6.45. Vjerojatnost uspješnog upita i vrijeme odziva ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=100$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, udio usmjerivača u mreži $\lambda=0,50$



Slika 6.46. Broj promjena kanala u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=100$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, udio usmjerivača u mreži $\lambda=0,50$

H-CLMC metode očito je kako niti jedna od spomenutih ne ostvaruje značajno manji broj promjena kanala, dok H-CLMC metoda ostvaruje aritmetički najmanji srednji broj promjena kanala u promatranom intervalu.

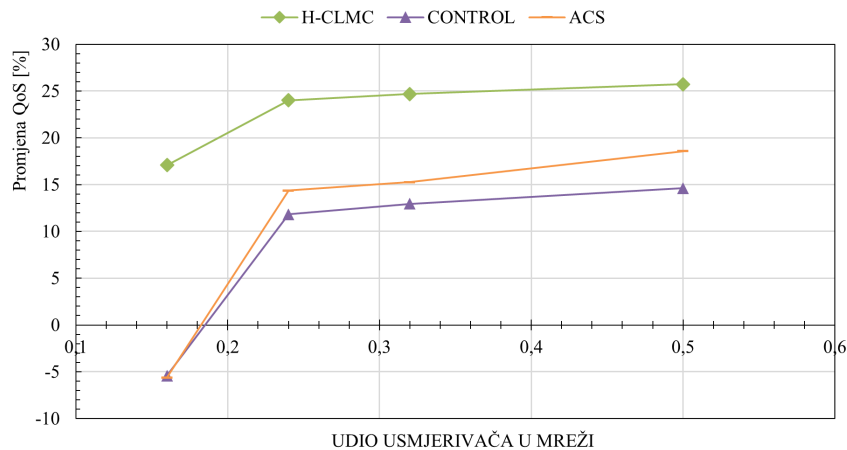
Posljednji dio vrednovanja predloženih protokola obuhvaća analizu utjecaja topologije mreže (točnije, udio usmjerivača u mreži) na kvalitetu usluge.

6.5.4. Analiza utjecaja topologije mreže na performanse predloženog protokola

Kao što je pokazano u prethodna dva potpoglavlja, udio usmjerivača u mreži ima značajan utjecaj na performanse višekanalnih protokola i metoda zbog činjenice da se uvođenjem dodatnih kanala u mreži sama mreža segmentira na frekvencijski odvojene podmreže. U tom slučaju, ukoliko se pokaže da omjer usmjerivača i kanala nije dovoljan, mreža neće ostvariti zadovoljavajuće performanse (pogotovo za ACS i CONTROL metodu). Zbog spomenutoga analizirano je ponašanje mreže za različite udjele usmjerivača u mreži te za prije opisana dva scenarija od 50 i 100 aktivnih čvorova. Također, zbog činjenice da inicijalni CLMC i H-CLMC protokol ostvaruju gotovo identične performanse, u ovoj analizi inicijalni CLMC protokol je izuzet.

Na slici 6.47 prikazan je dijagram promjene kvalitete usluge u mreži za dva krajnja odredišta (kanala) u mreži te za 50 aktivnih čvorova u mreži.

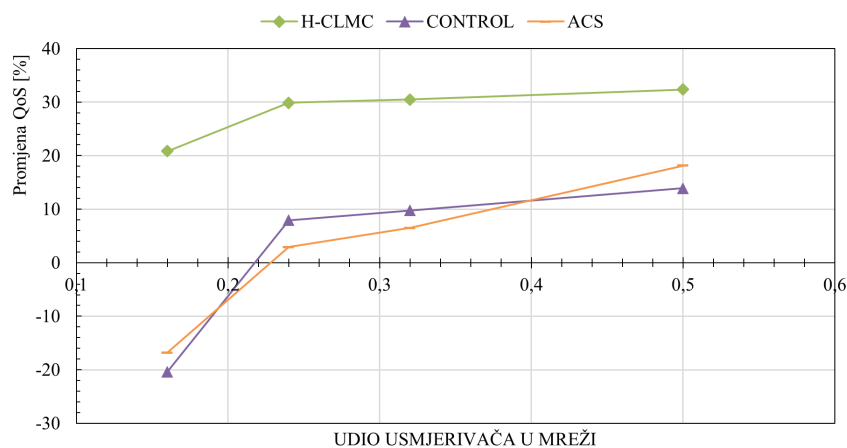
Kako je prije opisano, predloženi H-CLMC ostvaruje najveće poboljšanje kvalitete usluge te se uočava poboljšanje u ovisnosti o udjelu usmjerivača u mreži. U slučaju manjeg broja usmjerivača u mreži može se zaključiti kako sva rješenja ostvaruju manje poboljšanje kvalitete usluge. Granična točka u ovom slučaju predstavlja udio usmjerivača od $\lambda = 0,24$ pri kojem H-CLMC protokol ostvaruje gotovo maksimalno poboljšanje kvalitete usluge. Povećanjem broja usmjerivača neznatno raste i poboljšanje kvalitete usluge za H-CLMC protokol. S druge strane, metode CONTROL i



Slika 6.47. Promjena kvalitete usluge za različite protokole i udio usmjerivača u mreži; Broja krajnjih odredišta $C=2$, broj aktivnih čvorova $N = 50$

ACS ostvaruju nešto bolje performanse za veći broj usmjerivača u mreži, pogotovo ACS metoda kod koje se povećanjem broja usmjerivača u ovom scenariju značajnije povećava kvaliteta usluge.

Povećanjem broja kanala u mreži na tri za H-CLMC protokol dolazi do poboljšanja kvalitete usluge u mreži, čak i za vrijednosti granične povezanosti mreže ($\lambda = 0,16$) dok ostala rješenja uzrokuju degradaciju kvalitete usluge (slika 6.48).

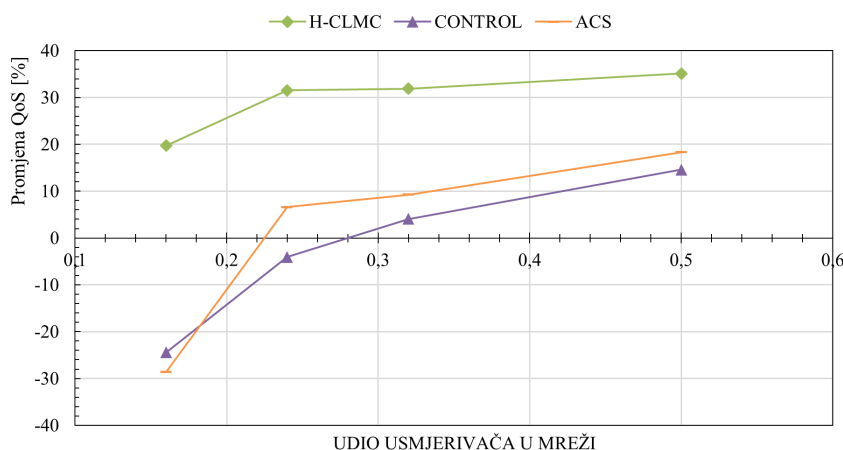


Slika 6.48. Promjena kvalitete usluge za različite protokole i udio usmjerivača u mreži; Broja krajnjih odredišta $C=3$, broj aktivnih čvorova $N = 50$

U slučaju tri krajnja odredišta u mreži može se vidjeti isti obrazac kao i na prethodnom dijagramu, gdje metode ACS i CONTROL povećanjem broja usmjerivača u mreži ostvaruju bolje performanse. S druge strane, H-CLMC ostvaruje gotovo maksimalno poboljšanje nakon granične točke i daljnje poboljšanje nije značajno izraženo. U usporedbi metoda ACS i CONTROL može se zaključiti kako povećanjem broja usmjerivača u mreži ACS metoda nadmašuje CONTROL me-

todu te za bolje povezane mreže ostvaruje bolje performanse. U ovom slučaju treba napomenuti da ACS metoda ostvaruje poboljšanje samo za udio usmjerivača od $\lambda = 0,50$, dok za manji broj usmjerivača ostvaruje degradacije performansi (iako je poboljšanje u rasponu od 3-8%).

Posljednji scenarij kod mreže od 50 aktivnih čvorova uključuje četiri krajnja odredišta u mreži i prikazan je na slici 6.49.

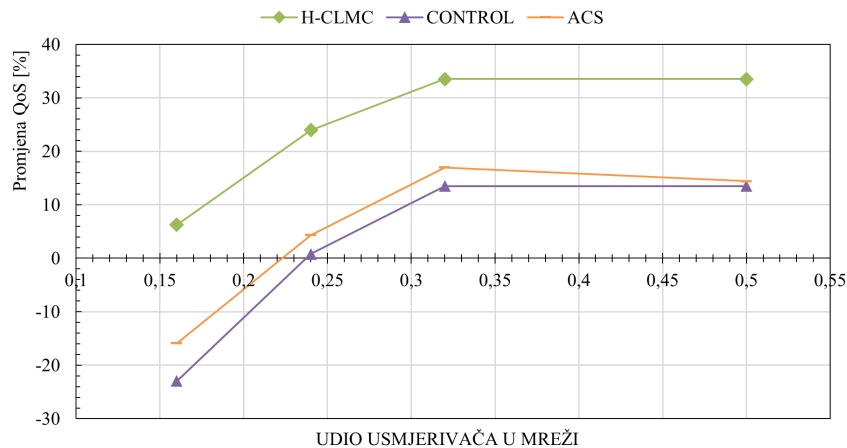


Slika 6.49. Promjena kvalitete usluge za različite protokole i udio usmjerivača u mreži; Broja krajnjih odredišta $C=4$, broj aktivnih čvorova $N = 50$

Povećanjem broja krajnjih odredišta u mreži pojavljuje se prije opisani problem degradacije performansi metoda ACS i CONTROL, dok predloženi H-CLMC protokol ostvaruje značajno poboljšanje performansi čak i za granični slučaj povezanosti mreže od $\lambda = 0,16$. Problem degradacija performansi i kvalitete usluge metoda ACS i CONTROL vidljiv je za gotovo cijeli interval broja usmjerivača u mreži, osim za posljednji slučaj sa $\lambda = 0,50$ gdje postoji velika vjerojatnost da je mreža dobro povezana. Ovdje se uviđa prednost H-CLMC protokola u odnosu na ostala rješenja gdje se povećanjem broja kanala u mreži poboljšavaju i performanse, dok ostali protokoli ne ostvaruju značajno poboljšanje kvalitete usluge povećanjem broja kanala u mreži.

Naposljetku, posljednji scenarij uzima u obzir 100 aktivnih čvorova u mreži te dva i tri krajnja odredišta/kanala. Dijagram promjene kvalitete usluge za dva kanala u mreži prikazan je na slici 6.50.

Kao i u prethodnim scenarijima s 50 aktivnih čvorova u mreži, i u ovom scenariju može se vidjeti prije spomenuta granična točka, koja je u ovom slučaju pomaknuta prema većem broju usmjerivača u mreži (većem udjelu). No isto tako, poboljšanje kvalitete usluge za protokol H-CLMC je veće nego u slučaju sa 50 aktivnih čvorova u mreži, dok je za ACS i CONTROL metode poboljšanje na istoj razini. Ovo govori o skalabilnosti H-CLMC protokola tendencijom da ostvaruje bolje

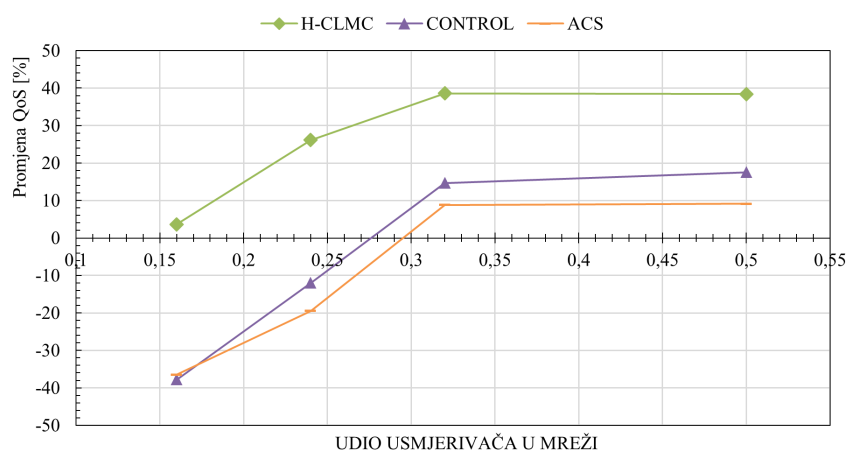


Slika 6.50. Promjena kvalitete usluge za različite protokole i udio usmjerivača u mreži; Broja krajnjih odredišta $C=2$, broj aktivnih čvorova $N = 100$

poboljšanje kvalitete usluge u većim mrežama. Ovo je potvrđeno i u prethodnim potpoglavljima te u scenariju s jednim skokom (bez usmjeravanja).

Što se tiče CONTROL i ACS metode, u slučaju mreže sa 100 aktivnih čvorova ostvaruje se poboljšanje kvalitete usluge samo u slučaju većeg udjela usmjerivača u mreži (za $\lambda \geq 0,36$). U slučaju granične povezanosti mreže ostvaruje se velika degradacija performansi mreže, daleko ispod performansi osnovnog LWM protokola.

Naposljetku, analiziran je posljednji scenarij sa 100 aktivnih čvorova u mreži i tri krajnja odredišta (kanala) u mreži (slika 6.51).



Slika 6.51. Promjena kvalitete usluge za različite protokole i udio usmjerivača u mreži; Broja krajnjih odredišta $C=3$, broj aktivnih čvorova $N = 100$

Iz dijagrama na slici očito je kako povećanje broja odredišta u mreži povoljno utječe na H-CLMC protokol, koji ostvaruje dodatno poboljšanje kvalitete usluge u odnosu na scenarij s dva

krajnja odredišta u mreži (kanala). No i ovdje je važno zadovoljiti točku granične povezanosti mreže, pri čemu bi se stvorio veliki broj izoliranih otoka u mreži. Iako predloženi protokol smanjuje utjecaj granično povezanosti mreže i višekanalnog problema gluhog čvora, svejedno treba poduzeti sve da se ne dogode scenariji u kojima će i predloženi protokol rezultirati degradacijom performansi. U slučaju sa 100 aktivnih čvorova taj slučaj je vidljiv kada je udio usmjerivača u mreži $\lambda = 0,16$. U tom slučaju kvaliteta usluge će degradirati, stoga takve uvjete u mreži treba izbjegavati.

S druge strane, H-CLMC će u uvjetima manje povezanosti izvan granične točke ostvariti značajno poboljšanje kvalitete usluge u uvjetima kad ACS i CONTROL rezultiraju značajnom degradacijom kvalitete usluge i performansi mreže (za $\lambda = 0,24$).

6.6. Zaključak poglavlja

Vrednovanjem inicijalne metode za poboljšanje kvalitete usluge u bežičnim senzorskim i aktor-skim mrežama (CLMC) zaključeno je kako predložena CLMC metoda ostvaruje povećanje kvalitete usluge u scenariju kada mreža nije jače opterećena, dok se u području većeg zagušenja mreže javlja degradacija performansi. U cilju otklanjanja nedostataka CLMC metode predložena je nova H-CLMC metoda i pripadajući protokol komunikacije.

Dodavanjem nekoliko poboljšanja postojeće CLMC metode smanjuju se problemi metode. Navedena poboljšanja uključuju: uvođenje vremenskog ograničenja promjene kanala kao funkcije vjerojatnosti procijenjenoga vremena odziva, proširenje klasifikatora statusa i EWMA estimatora, dohvaćanje CQPS podatka krajnjeg odredišta u mreži, unaprjeđenje algoritma procjene promjene kanala. Sama metoda sastoji se od postupaka klasifikacije informacija sa slojeva protokolnog stoga, postupaka izračuna vrijednosti parametara p_{RTT} , $p_n[c]$, p_{avg} , p_{CQPS} te H-CLMC algoritma, koji koristi dobivene vrijednosti u cilju optimalne promjene kanala. Navedena poboljšanja su detaljno opisana te je na posljetku predložen H-CLMC algoritam promjene kanala.

Kako bi se predložena metoda mogla u potpunosti integrirati u protokolni stog potrebno je bilo H-CLMC metodu primijeniti na postojeći LWM protokol. Na dobivenom H-CLMC protokolu izvršeno je vrednovanje performansi i poboljšanja kvalitete usluge za predložene CLMC i H-CLMC metode, dvije metode iz literature (CONTROL i ACS) te osnovni (jednokanalni) LWM protokol.

Prvo vrednovanje provedeno je za broj aktivnih čvorova od 10 do 40 te za različita maksimalna vremena između slanja upita T_{max} u topologiji bez usmjeravanja. Ukoliko se promatraju oba predložena protokola (CLMC i H-CLMC) može se zaključiti kako oba rješenja ostvaruju poboljšanje

kvalitete usluge u usporedbi s rješenjima iz literature, u scenariju s jednim skokom. Ukoliko se analizira H-CLMC protokol u odnosu na srednje vrijeme kašnjenja predloženi H-CLMC protokol ostvaruje bolje performanse (manje vrijeme odziva) u mreži s većim brojem krajnjih odredišta. Sa strane broja promjena kanala, može se zaključiti kako predloženi H-CLMC protokol ostvaruje najmanji broj promjena kanala, što predstavlja manji utrošak resursa. U usporedbi sa CLMC metodom H-CLMC ne povećava broj promjena kanala pri povećanju zagušenja u mreži, što je bio glavni problem CLMC metode.

Kako bi se proučila primjenjivost predloženog rješenja u mrežama s više skokova napravljena je simulacija predloženog protokola u većim mrežama te je izvršeno drugo vrednovanje za scenarij od 50 i 100 čvorova. Na temelju rezultata simulacija moguće je zaključiti kako predloženi protokoli CLMC i H-CLMC ostvaruju poboljšanje kvalitete usluge čak i u uvjetima granične povezanosti mreže. Metode CONTROL i ACS u slučaju mreže sa 100 aktivnih čvorova ostvaruju poboljšanje kvalitete usluge samo u slučaju većeg udjela usmjerivača u mreži (za $\lambda \geq 0,36$) dok u slučaju granične povezanosti mreže ostvaruju veliku degradaciju performansi mreže, daleko ispod performansi osnovnog LWM protokola. Treba napomenuti kako povećanje broja odredišta u mreži povoljno utječe na H-CLMC protokol, koji ostvaruje dodatno poboljšanje kvalitete usluge u odnosu na scenarij s dva krajnja odredišta u mreži (kanala). S druge strane, H-CLMC će u uvjetima manje povezanosti mreže ostvariti značajno poboljšanje kvalitete usluge u uvjetima kad ACS i CONTROL rezultiraju značajnom degradacijom kvalitete usluge. Iz navedenog se uviđaju prednosti predloženog H-CLMC protokola u slučaju granične povezanosti mreže.

Ovim se može zaključiti poglavlje vrednovanja predloženog H-CLMC protokola s prednostima u odnosu na CONTROL i ACS metode iz literature. Zbog činjenice da je predloženi protokol vrednovan metodom simulacije, u sljedećem poglavlju isti će biti vrednovan eksperimentalno u laboratorijskim uvjetima.

7. EKSPERIMENTALNO VREDNOVANJE PREDLOŽENOG PROTOKOLA KOMUNIKACIJE

Nakon vrednovanja predloženih protokola metodom simulacije u ispitnom okruženju napravljeno je i eksperimentalno vrednovanje predloženog protokola komunikacije. Na temelju predloženog ispitnog okruženja u poglavlju 4.4 napravljena su mjerenja za scenarij s jednim skokom (bez usmjeravanja) te scenarij s usmjeravanjem i 50 čvorova u mreži.

Tijekom eksperimenta korištena je ista topologija kao i u simulaciji (topologija zvijezde), gdje su u prvom slučaju (scenarij s jednim skokom) čvorovi nasumično postavljeni unutar promatranog područja, što je definirano u poglavlju 4.4. Parametri eksperimenta za hibridni model koordinacije definirani su u poglavlju 4.1 i isti su korišteni u eksperimentalnom vrednovanju. Mreža se sastoji od ukupno N aktivnih čvorova (čvorovi koji šalju upite). Čvorovi su postavljeni unutar promatranog područja od 30m x 30m, te se komunikacija odvija kroz maksimalno dva zida debljine 30 cm. Ovim je simulirano veće gušenje radijske propagacije što će u otvorenom prostoru rezultirati većim dometom signala (procjena je 100m x 100m u otvorenom prostoru, prema [36]).

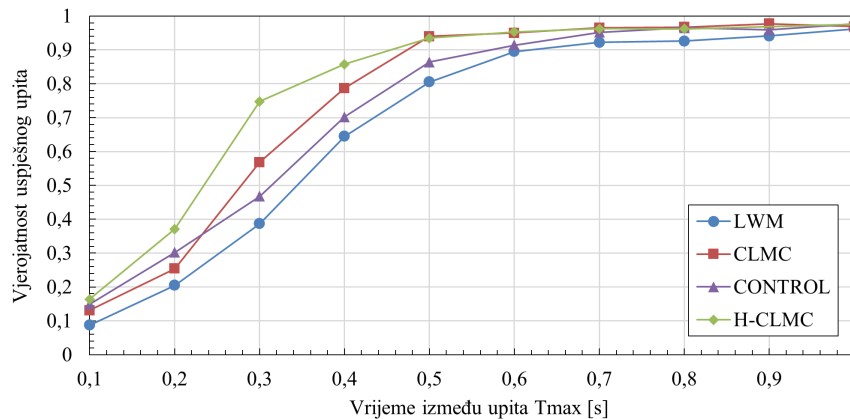
U prvom slučaju komunikacija je 1-skok - bez usmjeravanja. Postavljeno je maksimalno dva krajnja odredišta (kanala) u mreži u središtu promatranog područja i isto toliko frekvencijskih kanala je dodijeljeno. Svako krajnje odredište u mreži je postavljeno na drugi frekvencijski kanal. Krajnja odredišta u mreži ne mijenjaju kanale. Svi čvorovi imaju izravnu vezu s krajnjim odredištem u mreži i niti jedan čvor se ne nalazi na granici prijema signala. Korištene metrike kvalitete usluge definirane su u poglavlju 4 (vjerojatnost uspješnog upita i vrijeme odziva).

U drugom slučaju (scenarij s usmjeravanjem) čvorovi su nasumično postavljeni kroz nekoliko etaža zgrade te su usmjerivači postavljeni u obliku rešetke prema prije opisanom scenariju simulacije u poglavlju 6.5, kako bi zadovoljili zadani udio usmjerivača. U ovom scenariju analiziran je udio usmjerivača od $\lambda = 0,16$ iz čega se dobiva 8 usmjerivačkih čvorova.

Mjerenje je provedeno za 100 uzastopnih upita generiranih od čvorova prema krajnjem odredištu, u definiranom načinu rada hibridnog modela koordinacije u kritičnom scenariju (svi čvorovi simultano šalju upite prema krajnjem odredištu). Svaka točka na dijagramu dobivena je kao srednja vrijednost 3 mjerenja (zbog velikog vremenskog trajanja eksperimenta nije se išlo na veći broj ponavljanja). Zbog vrlo sličnih performansi ACS i CONTROL metoda, imajući u vidu kako CONTROL metoda daje bolje performanse u manjim mrežama, ista je odabrana za usporedbu u eksperimentalnom vrednovanju, dok ACS metoda nije korištena.

7.1. Scenarij bez usmjeravanja, 10 do 40 aktivnih čvorova

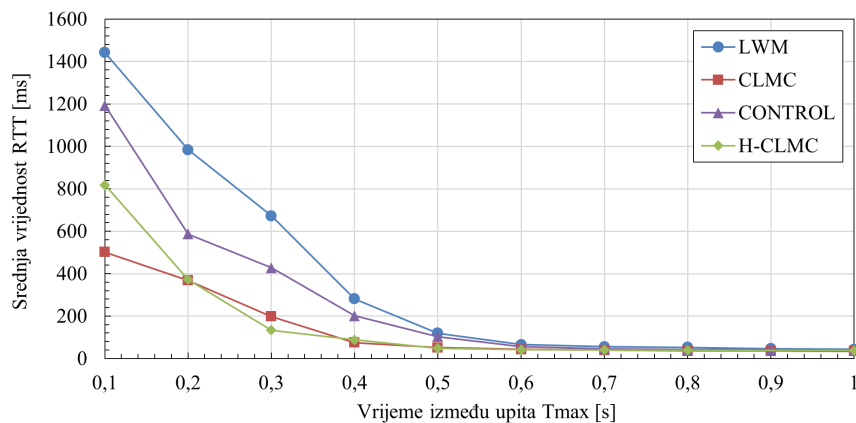
Prvi scenarij obuhvaća mrežu s jednim skokom, gdje su implementirani protokoli CLCM, H-CLMC, CONTROL te osnovni jednokanalni LWM protokol. Za slučaj sa 10 aktivnih čvorova u mreži rezultati mjerenja vjerojatnosti uspješnog upita prikazani su na slici 7.1.



Slika 7.1. Vjerojatnost uspješnog upita u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=10$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, eksperiment

Prema dijagramu na slici u slučaju sa 10 aktivnih čvorova u mreži i dva krajnja odredišta (kanala) dobiveni rezultati mjerenja mogu se poistovjetiti sa rezultatima simulacija (slika 6.14) gdje se može vidjeti kako predloženi H-CLMC protokol ostvaruje najbolje performanse i najbolju kvalitetu usluge, promatrano s aspekta vjerojatnosti uspješnog upita. Isto tako, za inicijalno predloženi CLMC protokol može se zaključiti kako u području većeg zagušenja mreže (u ovom slučaju za $T_{max} < 0,3$ s) događa se ista degradacija performansi koja je potvrđena simulacijom. U tom slučaju protokol CONTROL ostvaruje bolje performanse zbog manjeg broja promjena kanala, čime se smanjuje vjerojatnost gubitka paketa uzrokovano višekanalnim problemom skrivenog čvora.

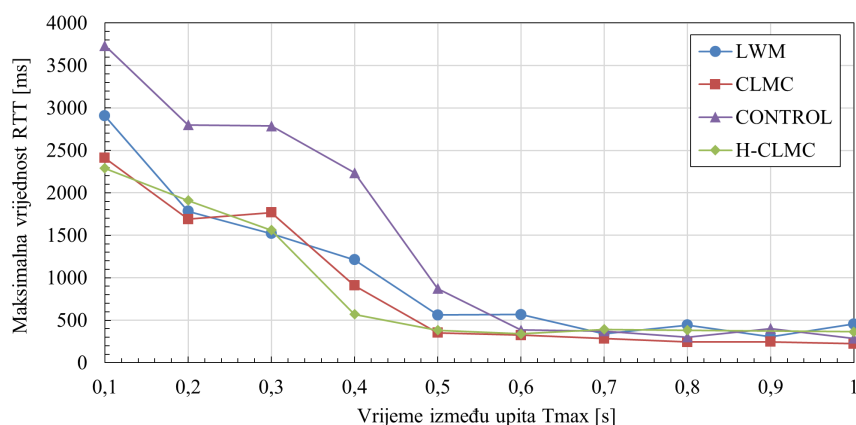
Nadalje, ukoliko se promatra srednja vrijednost vremena odziva (slika 7.2) može se zaključiti kako sva rješenja koja su ispitana ostvaruju smanjenje vremena odziva u usporedbi s osnovnim LWM protokolom.



Slika 7.2. Srednje vrijeme odziva u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=10$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, eksperiment

Ukoliko se detaljnije pogleda dijagram vremena odziva može se zaključiti kako CLMC protokol ostvaruje najmanje vrijeme odziva u mreži, dok ga slijedi H-CLMC protokol. Nešto veću srednje vrijeme odziva ostvaruje CONTROL protokol. Sukladno tome, može se zaključiti kako predloženi H-CLMC predstavlja optimalni kompromis između vremena odziva i vjerojatnosti uspješnog upita jer ostvaruje najveću vjerojatnost uspješnog upita uz određeno povećanje vremena odziva, u usporedbi s CLMC protokolom.

Posljednja metrika kvalitete usluge obuhvaća maksimalno vrijeme odziva čiji dijagram je prikazan na slici 7.3.

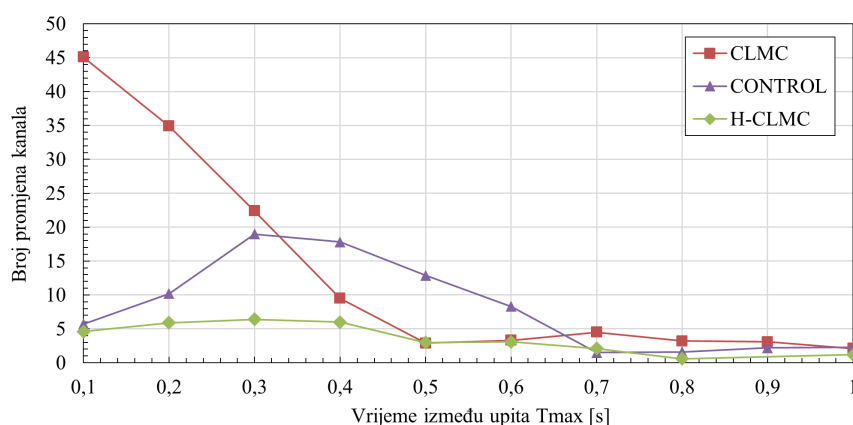


Slika 7.3. Maksimalno vrijeme odziva u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=10$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, eksperiment

Kao što je prikazano na dijagramu (slika 7.3) može se vidjeti kako niti jedno od rješenja značajno ne poboljšava maksimalno vrijeme odziva. S druge strane, uviđa se kako CONTROL uzrokuje povećanje maksimalnog vremena odziva što svakako predstavlja negativnu komponentu u

aspektu poboljšanja kvalitete usluge. Također, može se vidjeti kako protokol H-CLMC ostvaruje smanjenje maksimalnog vremena odziva u slučaju kad mreža nije jako zagušena (ovdje za $T_{max} < 0,3$ s) te u spomenutim uvjetima ostvaruje najmanje vrijednosti vremena odziva (zajedno s CLMC).

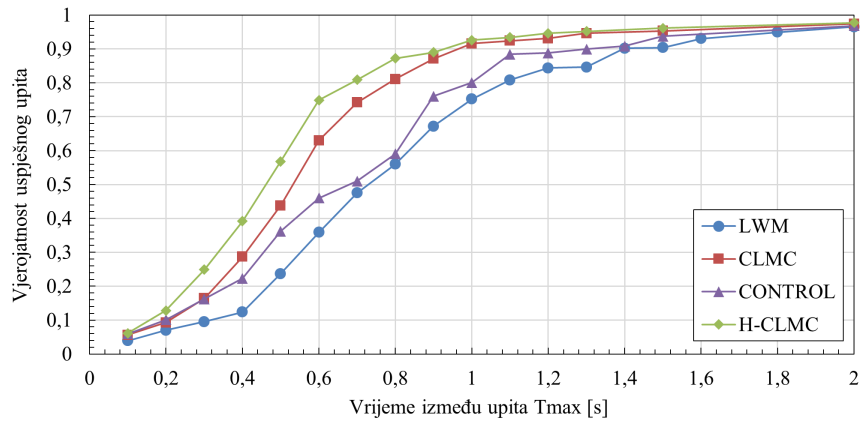
Naposljetku, za situaciju sa 10 aktivnih čvorova u mreži analiziran je broj promjena kanala u mreži za sva rješenja. Dijagram ukupnog broja promjena kanala za scenarij od 10 aktivnih čvorova prikazan je na slici 7.4.



Slika 7.4. Broj promjena kanala u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=10$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, eksperiment

Iz prikazanog dijagrama očito je kako najmanji broj promjena kanala ostvaruje H-CLMC protokol. S druge strane, inicijalno predloženi CLMC protokol ostvaruje vrlo visok broj promjena kanala, što u uvjetima većeg zagušenja rezultira u degradaciji performansi mreže. Zbog spomenutoga predložen je H-CLMC koji je prilagođen za hibridni model koordinacije te smanjuje broj promjena kanala u mreži.

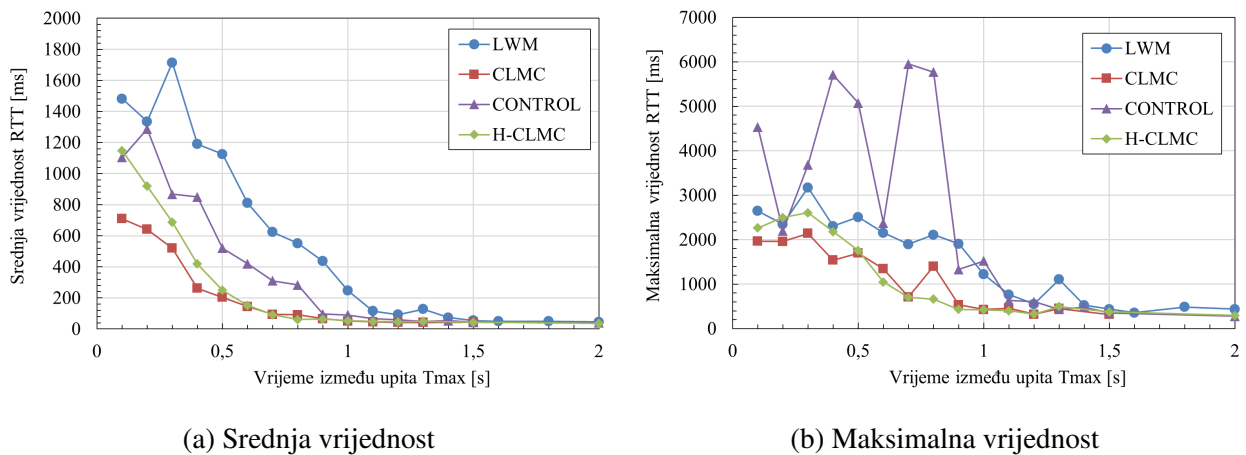
Nadalje, razmatran je scenarij sa 20 aktivnih čvorova i dva krajnja odredišta u mreži s aspekta vjerojatnosti uspješnog upita (slika 7.5).



Slika 7.5. Vjerojatnost uspješnog upita u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=20$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, eksperiment

U situaciji sa 20 aktivnih čvorova u mreži (slika 7.5) može se zaključiti kako i u ovom slučaju eksperiment prati simulaciju, dok se odstupanja mogu vidjeti u razlici između promatranih rješenja i LWM protokola. Naime, postupkom simulacije ostvaruje se nešto veće poboljšanje kvalitete usluge u usporedbi s osnovnim LWM protokolom, no poredak samih protokola ostaje nepromijenjen. Dok u simulaciji inicijalno predloženi CLMC protokol ostvaruje nešto lošije performanse u području većeg zagušenja, u eksperimentu to nije toliko intenzivno izraženo (u situaciji s 20 aktivnih čvorova).

Ukoliko se razmotri metrika srednjeg i maksimalnog vremena odziva, pripadajući dijagrami prikazani su na slici 7.6.

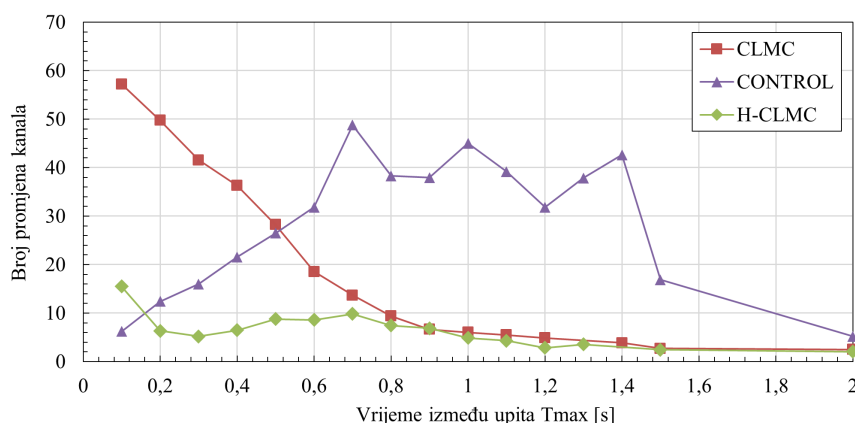


Slika 7.6. Vrijeme odziva u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=20$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, eksperiment

Prema dijagramu srednjeg vremena odziva (slika 7.6a) može se zaključiti kako sva predložena rješenja poboljšavaju kvalitetu usluge smanjenjem vremena odziva u mreži. Kao i u simulaciji te

u prethodnom eksperimentu, CLMC protokol ostvaruje najmanje vrijeme odziva, dok CONTROL ostvaruje najveće vrijeme odziva. Sa strane maksimalnog vremena odziva (slika 7.6) situacija je vrlo slična kao i u scenariju sa 10 aktivnih čvorova, dok se u ovom scenariju ipak ostvaruje poboljšanje maksimalnog vremena odziva. Najmanju vrijednost maksimalnog vremena odziva ostvaruju CLMC i H-CLMC protokoli, dok CONTROL ostvaruje daleko najveće vrijednosti maksimalnog vremena odziva (veće od LWM protokola).

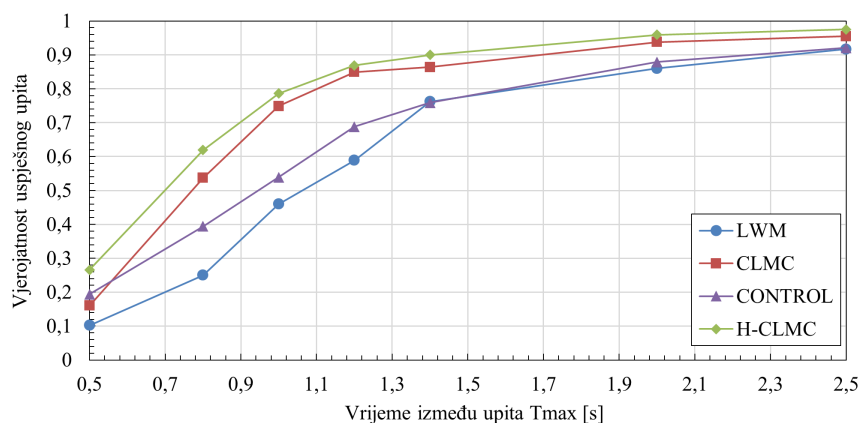
Ukoliko se situacija sa 20 aktivnih čvorova promotri kroz broj promjena kanala u mreži (slika 7.7), situacija je gotovo identična kao i u scenariju sa 10 aktivnih čvorova.



Slika 7.7. Broj promjena kanala u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=20$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, eksperiment

Predloženi CLMC protokol ostvaruje daleko najveći broj promjena kanala u području većeg zagušenja, dok se povećanjem vremena T_{max} smanjuje i broj promjena kanala. H-CLMC u ovom slučaju ostvaruje najmanji broj promjena kanala, osim za slučaj $T_{max} = 0, 1$ s kad ostvaruje nešto veći broj promjena kanala u usporedbi s CONTROL. Općenito se može zaključiti kako H-CLMC i u ovom slučaju ostvaruje najbolje performanse i najbolju kvalitetu usluge u mreži.

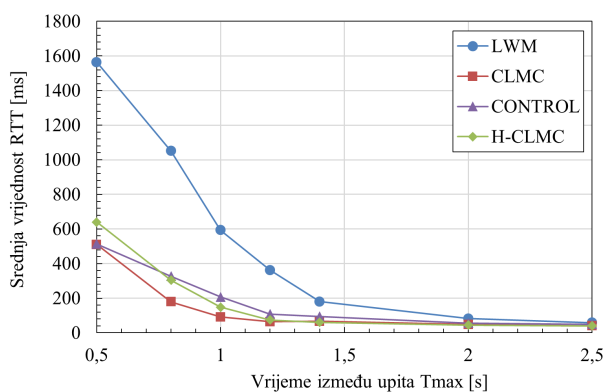
Povećanjem broja aktivnih čvorova u mreži na 30 (slika 7.8) povećava se prednost H-CLMC protokola naspram ostalih rješenja, te se smanjuje i prednost CONTROL protokola u usporedbi s osnovnim LWM protokolom.



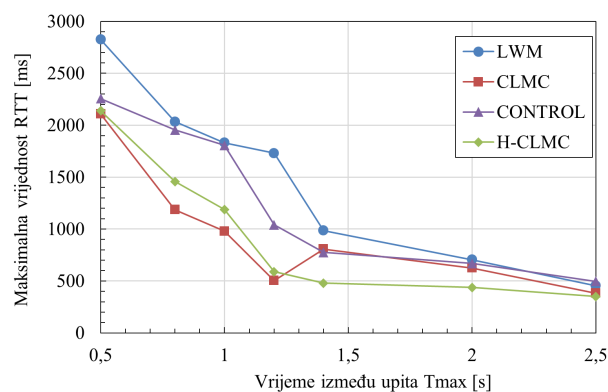
Slika 7.8. Vjerojatnost uspješnog upita u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=30$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, eksperiment

Sukladno simulaciji, u eksperimentu se događa degradacija performansi CLMC protokola u uvjetima većeg zagušenja u mreži (ovdje za $T_{max} < 0,8$ s), dok predloženi H-CLMC ostvaruje poboljšanje performansi vezano za vjerojatnost uspješnog upita. U uvjetima izvan većeg zagušenja u mreži razlika između CLMC i H-CLMC protokola se smanjuje, dok poboljšanje performansi u odnosu na CONTROL i dalje postoji.

S aspekta vremena odziva u mreži (slika 7.9) vidljivo je poboljšanje kvalitete usluge (smanjenjem vremena odziva) za sva promatrana rješenja.



(a) Srednja vrijednost



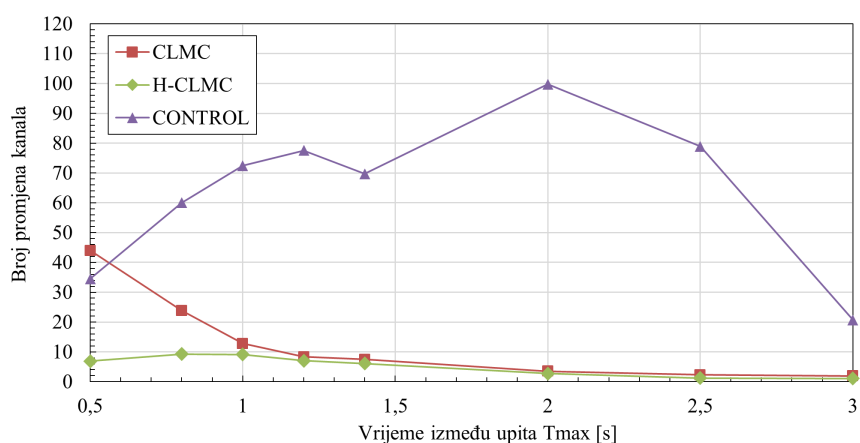
(b) Maksimalna vrijednost

Slika 7.9. Vrijeme odziva u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=30$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, eksperiment

Najveće smanjenje vremena odziva pokazuje CLMC protokol, dok H-CLMC ostvaruje nešto veće vrijednosti. Treba napomenuti kako svi protokoli ostvaruju smanjenje srednje i maksimalne vrijednosti vremena odziva, gdje se najbolje pokazao CLMC protokol. Analizirajući maksimalnu vrijednost vremena odziva, očito je kako CONTROL ostvaruje najmanje smanjenje vremena od-

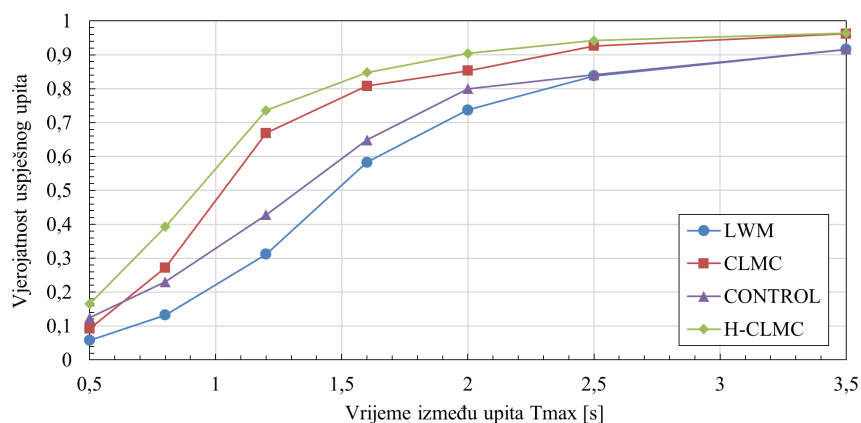
ziva. Uz ostvarivanje najmanjeg poboljšanja vjerojatnosti uspješnog upita CONTROL će ostvariti najlošije performanse sa strane kvalitete usluge u mreži.

Sa strane broja promjena kanala (slika 7.10) situacija je vrlo bliska prošlom slučaju, no zamjećuje se kako se povećanjem aktivnih čvorova u mreži povećava i broj promjena kanala za CONTROL protokol, dok CLMC i H-CLMC ostvaruju prosječno jednak broj promjena kanala po čvoru. Isti zaključak dobiven je i u simulaciji (slika 6.27) čime se može potvrditi dosljednost simulacije i eksperimenta.



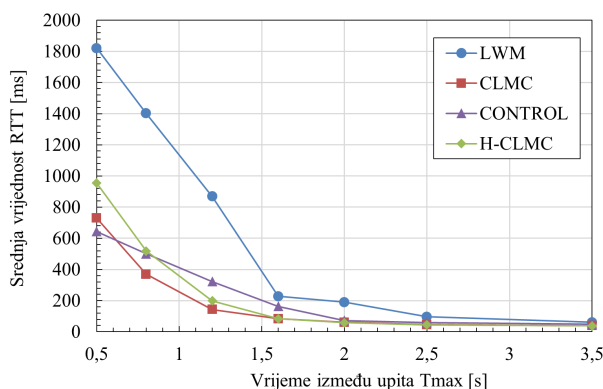
Slika 7.10. Broj promjena kanala u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=30$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, eksperiment

Naposljetku, zadnji scenarij u okviru vrednovanja performansi protokola za slučaj jednog skoka uzima u obzir 40 aktivnih čvorova u mreži (slika 7.11). Prema dijagramu vjerojatnosti uspješnog upita za 40 aktivnih čvorova u mreži situacija se može poistovjetiti i sa simulacijom i s prethodnim mjerenjima. Povećanjem broja aktivnih čvorova dolazi i do poboljšanja performansi predloženih CLMC i H-CLMC protokola, dok se poboljšanje CONTROL protokola smanjuje. Najbolje performanse i u ovom scenariju ostvaruje H-CLMC protokol dok CLMC za jako zagušenje u mreži ostvaruje slične nedostatke i smanjenje performansi kao i u simulaciji.

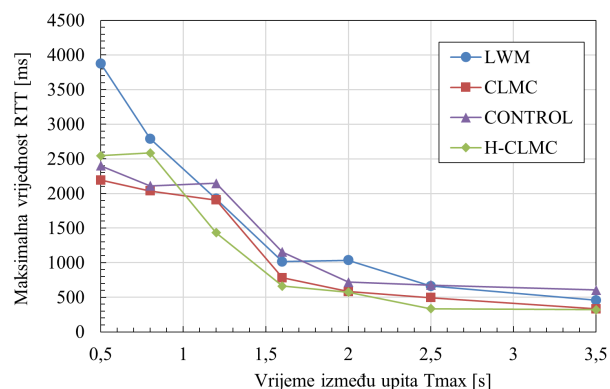


Slika 7.11. Vjerojatnost uspješnog upita u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=40$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, eksperiment

Ukoliko se promatra vrijeme odziva (slika 7.12) za scenarij sa 40 aktivnih čvorova u mreži, može se zaključiti kako sva rješenja ostvaruju poboljšanje kvalitete usluge (smanjenje srednjeg vremena odziva), dok isto kao u prethodnim scenarijima CLMC ostvaruje najmanju vrijednost vremena odziva. Analizirajući maksimalno vrijeme odziva dolazi se do zaključka kako H-CLMC ostvaruje najmanju vrijednost u situaciji kada mreža nije jako zagušena. U slučaju većeg zagušenja (za $T_{max} < 1$ s) CLMC i CONTROL ostvaruju nešto manju vrijednost maksimalnog vremena odziva.



(a) Srednja vrijednost

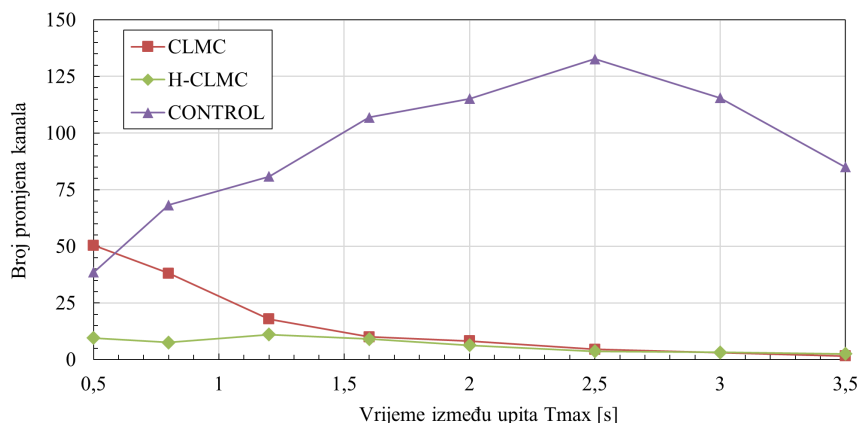


(b) Maksimalna vrijednost

Slika 7.12. Vrijeme odziva u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=40$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, eksperiment

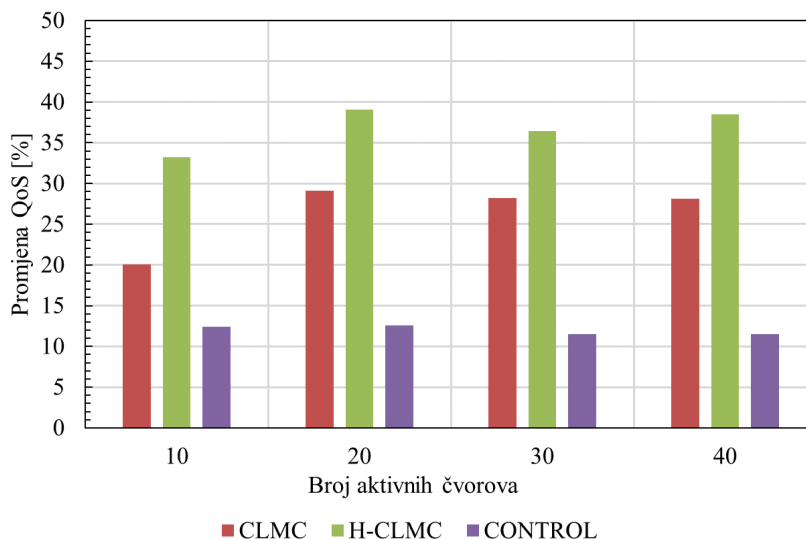
Naposljetku, ukoliko se promatra broj promjena kanala (slika 7.13) dolazi se do istog zaključka kao i u scenariju sa 30 aktivnih čvorova. Povećanjem broja aktivnih čvorova u mreži, CONTROL protokol povećava broj promjena kanala, pri čemu ostvaruje značajno veći broj promjena kanala nego protokoli CLMC i H-CLMC. I u ovom slučaju protokol H-CLMC ostvaruje najmanji broj

promjena kanala. Uz najveću vjerojatnost uspješnog upita u eksperimentalnom vrednovanju protokol H-CLMC ostvaruje najveću kvalitetu usluge u mreži.



Slika 7.13. Broj promjena kanala u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=40$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, eksperiment

Ukoliko se prikaže ukupno poboljšanje kvalitete usluge u eksperimentu (istom metodom kao i u simulaciji) može se dobiti poboljšanje kvalitete usluge u različitim scenarijima, za različite protokole. Dijagram poboljšanja kvalitete usluge prikazan je na slici 7.14.



Slika 7.14. Poboljšanje kvalitete usluge u ovisnosti o broju aktivnih čvorova N ; $C=2$ krajnja odredišta, eksperiment

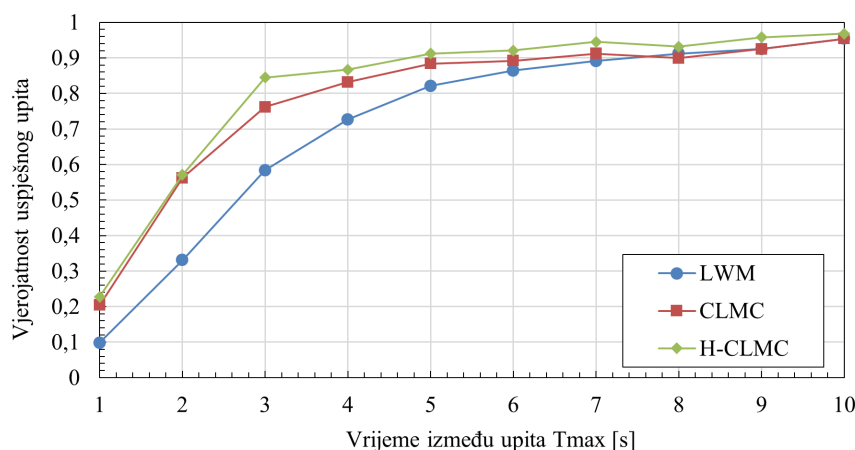
Prema stupčanom dijagramu može se potvrditi zaključak dan tijekom pojedinačne analize komunikacije kako predloženi H-CLMC protokol ostvaruje najveće poboljšanje kvalitete usluge u mreži. Nadalje, može se zaključiti kako se povećanjem broja aktivnih čvorova u mreži povećava kvaliteta usluge za H-CLMC i CLMC protokole, dok CONTROL ne pokazuje spomenute značajke.

Dobiveni rezultati mogu se usporediti s rezultatima simulacije prikazanim na slici 6.28 iz čega se može zaključiti kako eksperiment dobro prati simulaciju u odnosu spomenutih protokola. Također, može se uvidjeti kako se i u simulaciji i u eksperimentu, uviđa povećanje kvalitete usluge pri povećanju broja aktivnih čvorova, za protokole CLMC i H-CLMC.

7.2. Scenarij s usmjeravanjem i 50 aktivnih čvorova u mreži

Posljednji scenarij eksperimentalnog vrednovanja obuhvaća veću mrežu sa 50 aktivnih čvorova u mreži, kako je provedeno i postupkom simulacije. Kako bi se ispitala prednost predloženih protokola eksperiment je proveden za udio usmjerivača u mreži od $\lambda = 0,16$, što u ovoj mreži daje osam usmjerivača. Mreža je postavljena u zgradi Fakulteta gdje je simuliran scenarij iz simulacije (opisan u poglavlju 6.5), kako bi se omogućila komunikacija s više skokova. Korištena su dva krajnja odredišta (kanala) koja su postavljena u središtu strukture. Struktura je pozicionirana kroz četiri etaže gdje je gušenje signala sa zidovima simuliralo veću udaljenost mreže. Zbog kompleksnosti i veličine same mreže mjerenje je odrađeno samo za predložene CLMC i H-CLMC protokole.

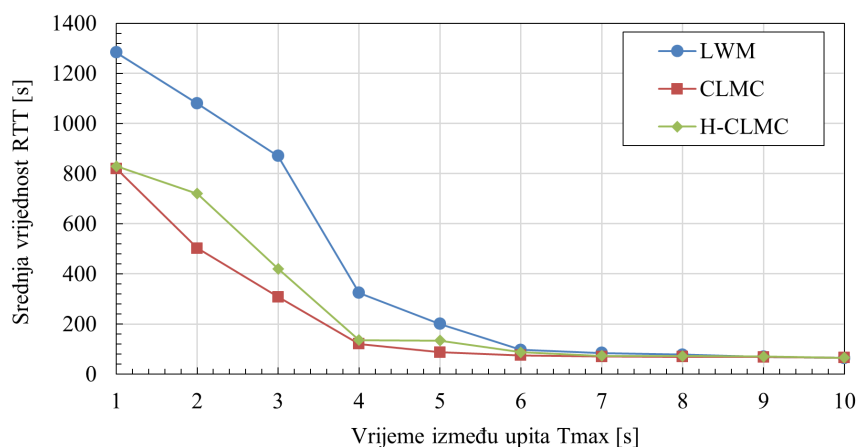
Na slici 7.15 prikazano je mjerenje performansi kvalitete usluge s obzirom na vjerojatnost uspješnog upita.



Slika 7.15. Vjerojatnost uspješnog upita u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=50$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, eksperiment

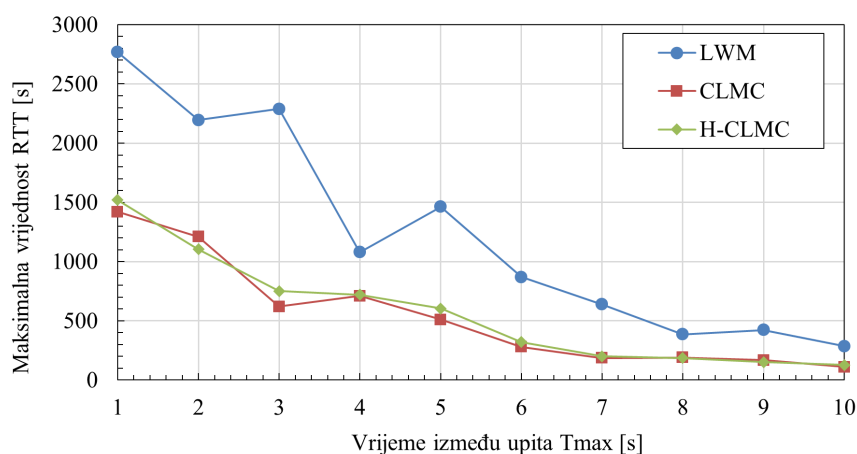
Iz dobivenog dijagrama vjerojatnosti uspješnog upita može se zaključiti kako predloženi CLMC i H-CLMC protokoli ostvaruju poboljšanje kvalitete usluge i u mrežama s više skokova, na isti način kako je dobiveno postupkom simulacije. Isto tako, za veće mreže može se zaključiti kako je razlika između CLMC i H-CLMC protokola vrlo mala te da u velikom rasponu mreže CLMC i H-CLMC ostvaruju gotovo jednake performanse.

Nadalje, ukoliko se promatra srednja vrijednost vremena odziva (prikazano na slici 7.16) može se zaključiti kako oba protokola ostvaruju smanjenje vremena odziva.



Slika 7.16. Srednje vrijeme odziva u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=50$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, eksperiment

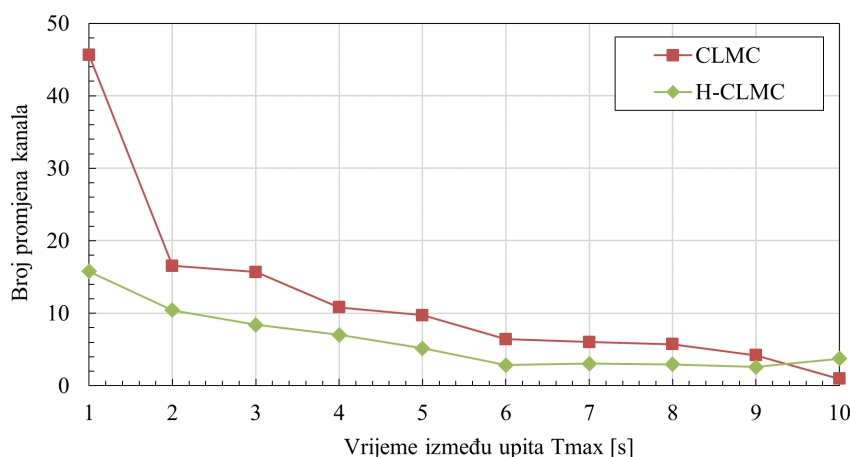
Treba napomenuti da iako H-CLMC pokazuje nešto bolje performanse sa strane vjerojatnosti uspješnog upita, kod metrike vremena odziva ostvaruje nešto veće vrijeme odziva nego CLMC protokol. Sličan zaključak donesen je tijekom simulacije, gdje se uviđa kompromis između većeg kašnjenja i veće vjerojatnosti uspješnog upita. Ukoliko se promotri maksimalna vrijednost vremena odziva (slika 7.17) također se uviđa kako oba protokola ostvaruju poboljšanje kvalitete usluge u obliku smanjenja maksimalne vrijednosti vremena odziva.



Slika 7.17. Maksimalno vrijeme odziva u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=50$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, eksperiment

Naposljetku, zadnji pokazatelj u eksperimentalnom vrednovanju predloženih protokola komunikacije obuhvaća broj promjena kanala za višekanalne protokole. Dijagram je prikazan na slici

7.18).



Slika 7.18. Broj promjena kanala u ovisnosti o maksimalnom vremenu između upita T_{max} ; $N=50$ aktivnih čvorova, $C=2$ krajnja odredišta, eksperiment

Iz prikazanog dijagrama dolazi se do istog zaključka kao i postupkom simulacije: predloženi H-CLMC protokol ostvaruje manji broj promjena kanala, što uz povećanu vjerojatnost uspješnog upita u mreži i smanjeno vrijeme odziva ostvaruje bolju kvalitetu usluge u mreži. Navedeno predstavlja cilj ove doktorske disertacije.

7.3. Zaključak poglavlja

Eksperimentalno vrednovanje predloženih CLMC i H-CLMC protokola izvršeno je u laboratorijskim uvjetima, gdje je korištena topologija, sklopovlje i protokolni stog identičan onom u simulacijskom okruženju. Korištene metrike kvalitete usluge su prije definirane (vjerojatnost uspješnog upita, i vrijeme odziva). Ispitno okruženje opisano je u prethodnim poglavljima i sastoji se od projektiranih bežičnih senzorskih i aktorskih čvorova te krajnjih odredišta u mreži. Eksperimentalno vrednovanje provedeno je kroz dva scenarija: u prvom scenariju mreža je bez usmjeravanja (jedan skok) dok u drugom slučaju mreža koristi usmjeravanje.

U prvom scenariju analizirane su performanse protokola CLMC, H-CLMC, CONTROL i LWM za različit broj aktivnih čvorova u mreži (od 10 do 40). Analizom metrike vjerojatnosti uspješnog upita dobiveni rezultati mjerenja mogu se poistovjetiti s rezultatima simulacije. Pri tom se uviđa kako predloženi H-CLMC protokol ostvaruje najbolje performanse i najbolju kvalitetu usluga. Za CLMC protokol može se zaključiti kako u području većeg zagušenja mreže ostvaruje degradaciju performansi koja je potvrđena simulacijom. Ukoliko se promatra srednja vrijednost vremena odziva može se zaključiti kako sva rješenja koja su ispitana ostvaruju smanjenje vremena odziva u

usporedbi s osnovnim LWM protokolom. Nadalje, može se zaključiti kako niti jedno od rješenja značajno ne smanjuje maksimalno vrijeme odziva, dok CONTROL metoda uzrokuje povećanje maksimalnog vremena odziva.

U uvjetima izvan većeg zagušenja mreže razlika između CLMC i H-CLMC protokola se smanjuje, dok poboljšanje performansi u odnosu na CONTROL i LWM i dalje postoji. Zamjećuje se kako CONTROL protokol povećava broj promjena kanala povećanjem broja aktivnih čvorova u mreži. CLMC i H-CLMC ostvaruju prosječno jednak broj promjena kanala po čvoru. Isti zaključak donesen je i u simulaciji, čime se može potvrditi dosljednost simulacije i eksperimenta. Tijekom pojedinačne analize komunikacije donesen je zaključak kako predloženi H-CLMC protokol ostvaruje najveće poboljšanje kvalitete usluge u mreži. Isto tako, može se zaključiti kako se povećanjem broja aktivnih čvorova u mreži povećava kvaliteta usluge za H-CLMC i CLMC protokole, dok CONTROL ne pokazuje spomenute značajke.

Drugi scenarij eksperimentalnog vrednovanja obuhvaća mrežu sa 50 aktivnih čvorova u mreži, što je provedeno i postupkom simulacije, za mrežu s osam usmjerivača. Zbog kompleksnosti i veličine same mreže mjerenje je odrađeno samo za CLMC i H-CLMC protokole i temeljni LWM protokol. Na temelju podataka može se zaključiti kako predloženi CLMC i H-CLMC protokoli ostvaruju poboljšanje kvalitete usluge na jednak način kao i u simulaciji. Isto tako, može se zaključiti kako je razlika između CLMC i H-CLMC protokola vrlo mala te da u velikom rasponu mreže CLMC i H-CLMC ostvaruju gotovo jednake performanse prilikom eksperimentalnog vrednovanja. Naposljetku, predloženi H-CLMC protokol ostvaruje manji broj promjena kanala što uz povećanu vjerojatnost uspješnog upita u mreži i smanjeno vrijeme odziva ostvaruje poboljšanje kvalitete usluge u mreži.

Naposljetku, potrebno je komentirati razlike između simulacije i eksperimenta. Naime, u okviru eksperimentalnog vrednovanja donesen je zaključak kako rezultati eksperimenta dobro prate rezultate simulacije. Navedeno je zaključeno na temelju trenda poboljšanja kvalitete usluge u odnosu na osnovni LWM protokol. No treba napomenuti kako postoje razlike između eksperimenta i simulacije u stvarnim vrijednostima vjerojatnosti uspješnog upita i vremenu odziva. Glavnina te razlike nalazi se u području umjerenog zagušenja mreže, gdje je vjerojatnost uspješnog upita veća u simulaciji nego u eksperimentu. Isto tako, razlike u vjerojatnosti uspješnog upita se naziru i u području većeg zagušenja, što je i očekivano zbog nepredvidljivosti same mreže.

Problem usporedbe simulacije i eksperimenta nastaje kod metrike vremena odziva. Naime, u eksperimentu se postižu vrijednosti vremena odziva koje su dosta veće nego u simulaciji. Ovo se

može pripisati problemu modeliranja stvarnog sklopovlja koristeći simulator temeljen na diskretnim događajima (OMNeT++). Naime, problem se može razložiti na nemogućnost točnog modeliranja trajanja izvođenja pojedinih algoritama i operacija u sklopovlju, pri čemu se pojavljuje malo odstupanje simulacije i eksperimenta u uvjetima kad mreža nije zagušena. U tim uvjetima sklopovlje radi bez opterećenja dodatnog prometa i kašnjenja su lako modelirana. Problem nastaje u scenariju većeg zagušenja kad se vrijeme izvođenja algoritama povećava (u mikroupravljaču) zbog opterećenosti sklopovlja drugim zadacima. U tim uvjetima iznimno je teško modelirati vremena izvođenja algoritama, što za rezultat daje veća kašnjenja i veća vremena odziva eksperimenta.

Prema iznesenom može se zaključiti kako modeliranje protokola metodom simulacije daje dobru procjenu ponašanja predloženih protokola u stvarnim uvjetima, pri čemu treba imati na umu da odstupanja postoje. Bitan aspekt predstavlja sljedivost simulacije i eksperimenta, što je potvrđeno ovim eksperimentalnim vrednovanjem. Ovaj aspekt je vrlo bitan jer iako nije moguće točno procijeniti vrijednosti metrika moguće je procijeniti međusobno ponašanje mreže u određenim uvjetima. Primjer je vidljiv iz vjerojatnosti uspješnog upita i vremena odziva. Iako nije moguće točno procijeniti stvarnu vrijednost vremena odziva metodom simulacije, činjenica da se povećanjem vjerojatnosti uspješnog upita smanjuje vrijeme odziva je dovoljan pokazatelj koji govori o samom poboljšanju kvalitete usluge u mreži, bez izvođenja velikog broja eksperimenata. Ovo predstavlja okvir za mogućnost procjene kvalitete usluge u BSAM koje zbog svojih konfiguracija nije moguće eksperimentalno provjeriti (kao npr. velike mreže).

8. METODA PROCJENA KVALITETE USLUGE U VELIKIM BSAM I HIBRIDNOM MODELU KOORDINACIJE

U poglavljima 6 i 7 pokazano je kako predloženi H-CLMC protokol komunikacije ostvaruje poboljšanje kvalitete usluge u različitim konfiguracijama mreže. Pokazane su konfiguracije bez usmjeravanja i s usmjeravanjem, gdje je broj čvorova dostizao maksimalno 100 aktivnih čvorova. Ove konfiguracije mreža se najčešće susreću u literaturi kao konfiguracije za vrednovanje performansi predloženih protokola, no razvojem BSAM-a postaju ostvarive mreže s puno većim brojem čvorova. Iako ne postoji točna definicija, prema literaturi pod pojmom velikih BSM i BSAM smatraju se mreže s velikim brojem čvorova i većim promatranim područjem [24, 40, 141]. S aspekta broja čvorova može se donijeti zaključak kako su to mreže koji općenito sadrže više od 100 čvorova u mreži, iako ne postoji točno definirana granica. Stoga se u okviru ove disertacije pojam velike mreže odnosi na mreže s brojem čvorova većim od 100. Iz navedenog, postavlja se pitanje može li se procijeniti kvaliteta usluge u velikim mrežama na temelju dobivenih podataka simulacija, bez simuliranja svake konfiguracije mreže posebno tj. empirijskim modeliranjem mreže? Težnja pristupu empirijskog modeliranja mreže proizašla je iz visoke kompleksnosti simulacija velikih mreža, koje su dugotrajne (do 10-ak sati za jedan scenarij), zahtijevaju mnogo računalnih resursa i kompleksnu konfiguraciju komunikacijskog protokola.

U literaturi se pojavljuju rješenja koja proučavaju načine postavljanja velikih mreža na način da se opterećenje mreže jednoliko raspodijeli u mreži [142]. No problem ovog pristupa je u primjeni aplikacija koje nemaju strogo definiran promet, kao što je slučaj u hibridnom modelu koordinacije. Drugi pristupi modeliraju veliku mrežu modelom fluida, pri čemu se tokovi podataka ponašaju kao fluidi u mreži [141]. No i dalje preostaje pitanje procjene kvalitete usluge u spomenutim mrežama, posebno u hibridnom modelu koordinacije koji nije standardni model koordinacije. Kompleksnost problematike procjene kvalitete usluge u velikim mrežama opisana je u disertaciji [143], gdje glavnina istraživanja pokušava riješiti problem procjene kvalitete usluge u velikim mrežama (za multimedijske primjene). Stoga se u okviru ove disertacije predlaže osnovna metoda procjene kvalitete usluge u velikim BSAM i hibridnom modelu koordinacije, koja će predstavljati osnovu u budućem istraživanju.

Kako bi se mogla predstaviti osnovna metoda procjene kvalitete usluge u velikim BSAM i hibridnom modelu koordinacije, potrebno je sagledati ključne aspekte u skaliranju mreže iz laboratorijskih uvjeta u velike konfiguracije mreže. Prvi problem predstavlja domet komunikacije u

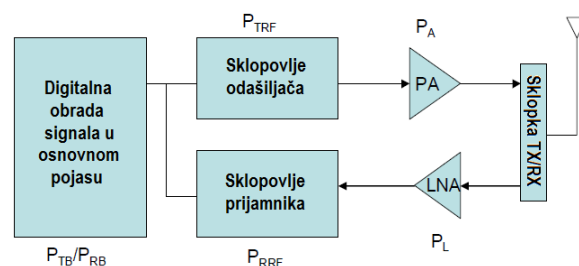
velikim mrežama. Naime, povećanjem veličine mreže povećava se i udaljenost između čvorova u mreži, što treba uzeti u obzir prilikom analize velike mreže. Nadalje, povećavanjem udaljenosti dolazi se do problema povezanosti mreže gdje može doći do stvaranja izoliranih otoka u mreži. Zbog činjenice da se u stvarnim mrežama mogu očekivati razni uvjeti u mrežama, potrebno je na dobar način modelirati radijsku komunikaciju i primijeniti odgovarajući model propagacije radijskog signala. Tu treba imati na umu i moguće radijske nepravilnosti u toku rada mreže (kao npr. fading, zasjenjivanje, refleksije i sl.) koje utječu na propagaciju radijskog signala. Naposljetku, iznimno je bitno definirati simulacijski okvir koji će se koristiti u simulaciji velikih mreža, kako bi se dobila ponovljivost istraživanja.

S tim ciljem potrebno je predložiti metodu procjene kvalitete usluge u velikim BSAM i hibridnom modelu koordinacije. Metoda za cilj ima procjenu kvalitete usluge na temelju empirijskog modela vjerojatnosti uspješnog upita i CQPS pokazatelja, čime se dobiva mogućnost procjene kvalitete usluge u raznim uvjetima u mreži, bez potrebe za izvođenjem dugotrajnih simulacija mreža.

8.1. Domet komunikacije i problem povezanosti velikih BSAM

Kvaliteta usluge u BSAM, kao koncept, svodi se na jamčenje vrijednosti metrika u ovisnosti o potraživanoj klasi QoS. Kada se govori o strukturi i veličini BSAM, zbog cjenovne pristupačnosti senzorskih čvorova i jednostavnosti izrade istih današnje BSAM se odlikuju vrlo velikim brojem čvorova te velikom gustoćom postavljanja čvorova. U današnjim mrežama taj broj raste na red veličine nekoliko tisuća čvorova u mreži, čime se dolazi do pojma velike mreže.

Promatrajući suvremene BSAM na fizičkom sloju, minijaturizacijom komponenata radio prijemnika i predajnika današnji čvorovi uz primopredajnik sadrže još i RF pretpojačala (engl. *Low Noise Amplifier*, LNA) te izlazna pojačala snage (engl. *Power Amplifier*, PA), što omogućuje povećani domet prijema i odašiljanja (slika 8.1).



Slika 8.1. Blok prikaz suvremenog bežičnog senzorskog čvora s LNA i PA [144]

Budući da današnji čvorovi posjeduju primopredajnike sa povećanom izlaznom snagom (20 dBm ili više) te povećanom osjetljivošću (-105 dBm ili manje) moguće je izračunati komunikacijski domet između dva suvremena čvora. Ukoliko se uzme u obzir da se propagacija radijskog signala odvija u slobodnom prostoru (engl. *free-space propagation*) te da su dobitci antene oba čvora $G = 2$ dBi (prema [83]), gubici slobodnog prostora mogu se izračunati kao [145]:

$$FSL = 32,44 + 20 \cdot \log(d[km]) + 20 \cdot \log(f[MHz]) \quad (8-1)$$

gdje je d udaljenost između dva čvora u kilometrima, f je frekvencija radio-komunikacijskog kanala u MHz a FSL su gubici slobodnog prostora u dB. Ukoliko FSL izrazimo preko snage prijemnog signala i snage odašiljača, primljena snaga na strani prijemnog senzorskog čvora (uz pretpostavku simetričnog RF kanala) iznosi [145]:

$$P_{RX} = P_{TX} - FSL + G_{RX} + G_{TX} - L_{RX} - L_{TX} \quad (8-2)$$

gdje je P_{RX} primljena snaga na prijemnoj strani, P_{TX} snaga odašiljača predajnog čvora, G_{RX} i G_{TX} dobitci antena, a L_{RX} i L_{TX} gubici prijenosa. Ukoliko se pretpostavi simetrični komunikacijski sustav (gdje su dobitci antena i gubici prijenosa prijamne i predajne strane jednaki) tj. homogenost čvorova, spomenuti izraz moguće je izvesti kao:

$$P_{RX} = P_{TX} - FSL + 2G - 2L \quad (8-3)$$

gdje je G dobitak prijemne/predajne antene, a L gubitak prijenosa prijemne/predajne strane. Iz jednadžbe (8-1) moguće je izračunati maksimalni domet, uzimajući u obzir marginu iščezavanja (engl. *fade margin*) od 20 dB učestalo korištenu u literaturi. Maksimalna udaljenost uspješne komunikacije tada postaje [146]:

$$d = 10^{\frac{(LS-M)}{20}} \quad (8-4)$$

gdje se LS može definirati kao ukupni gubitak [145]:

$$LS = P_{TX} - P_{RX} + 2 \cdot G - 2 \cdot L - 32,44 - 20 \cdot \log(f[MHz]) \quad (8-5)$$

Uzimajući frekvenciju komunikacijskog kanala od $f = 2450$ MHz, gubitke $L = 1$ dB te marginu iščezavanja $M = 20$ dB moguće je izračunati maksimalnu udaljenost komunikacije pomoću

jednadžbe (8-4) kao:

$$k = 20dBm - 105dBm + 2 * 2dBi - 2 * 1dB - 32,44 - 20 \cdot \log(2450MHz) = 26,816; \quad (8-6)$$

$$d = 10^{(26,816-20)/20} = \mathbf{2,19 \text{ km}} \quad (8-7)$$

Na temelju izloženog pokazano je kako suvremeni čvorovi imaju daleko veći domet od čvorova prošle generacije (dometa oko 100 m [39]) čime je omogućeno smanjenje broja skokova u mreži. Veći domet u konačnici rezultira manjim kašnjenjem (latencijama), ali i većim smetnjama od susjednih čvorova u slučaju zagušenja mreže što treba imati na umu.

8.1.1. Problem povezanosti velikih BSAM

Kada se govori o problemu povezanosti bežične mreže, govori se o bitnom aspektu komunikacije gdje se definira u kojoj mjeri je neka bežična mreža povezana. Povezanost bežične mreže govori o sposobnosti mreže da proslijedi željenu informaciju s izvora prema krajnjem odredištu u mreži (mrežnom koordinatoru ili *gateway* uređaju), koristeći sve raspoložive resurse mreže. Ovo je ostvarivo ako i samo ako postoji put kroz mrežu od izvorišnog čvora prema odredišnom čvoru. Problem povezanosti u BSAM se proučava koristeći teoriju grafova. Ako se uzme da se BSAM sastoji od n čvorova koji su $n \in \mathbb{Z}^+$ nasumično raspoređeni na promatranom području te postoji samo jedno krajnje odredište u mreži (engl. *sink*). Tada je BSAM moguće prikazati kao neusmjereni graf $G(V, E)$, gdje V predstavlja broj čvorova u grafu, a E predstavlja broj grana. Svaka grana u grafu predstavlja dvosmjerni komunikacijski kanal, dok svaki čvor grafa predstavlja mrežni čvor. Stoga, dobiveni graf BSAM mreže prikazuje samo one čvorove koji imaju izravnu vezu s drugim čvorovima, dok one veze koji nisu moguće (zbog nedovoljne jačine radijskog signala) nisu prikazane u grafu. Ukoliko se pretpostavi da svi čvorovi imaju jednak komunikacijski domet (simetrični komunikacijski kanal) dobiveni graf se naziva neusmjerenim grafom [147].

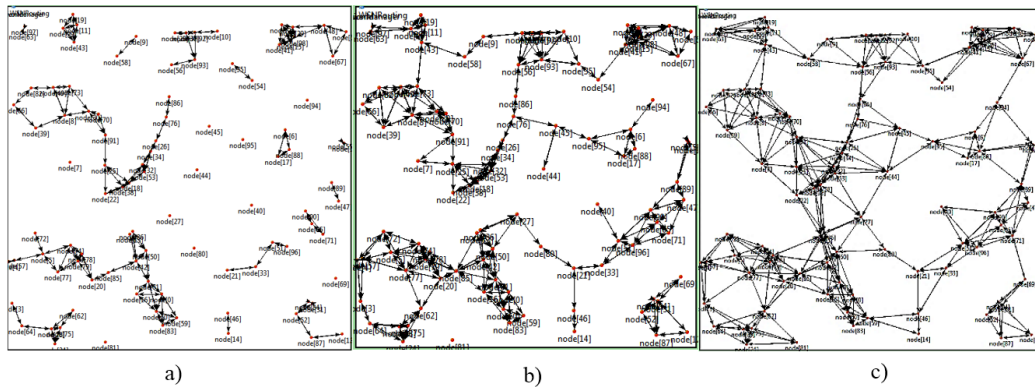
Kada se govori o povezanosti mreže razlikujemo tri tipa povezanosti:

- **Nepovezana mreža** - predstavlja konfiguraciju mreže gdje se pojavljuju čvorovi koji nemaju niti jednog susjeda u komunikacijskom dometu. U ovom slučaju spomenuto čvorovi su potpuno izolirani od mreže i ne mogu obavljati nikakvu funkcionalnost.
- **Djelomično povezanost** - u ovom slučaju svi čvorovi imaju vezu prema nekim drugim čvo-

rovima no postoji mogućnost stvaranja "otoka" koji su komunikacijski odvojeni od drugih segmenata mreže. U ovom slučaju mreža može imati ograničenu funkcionalnost (pogotovo u konfiguracijama s više krajnjih odredišta ili *gateway* uređaja).

- **Potpuna povezanost** - predstavlja krajnji cilj dizajna mreže, gdje svaki čvor može izravno ili preko nekog drugog čvora proslijediti poruku bilo kojem drugom čvoru u mreži.

Jednostavna definicija povezane mreže se može sagledati sa strane grafa koji prikazuje mrežu, gdje se povezana mreža definira kao graf koji sadrži granu između svakog para čvorova (tj. svaki čvor ima vezu s bilo kojim drugim čvorom bilo to izravnom granom ili preko nekog drugog čvora). Prikaz potpuno povezane, djelomično povezane mreže i nepovezane mreže prikazan je na slici 8.2 koja je dobivena putem simulatora OMNeT++.



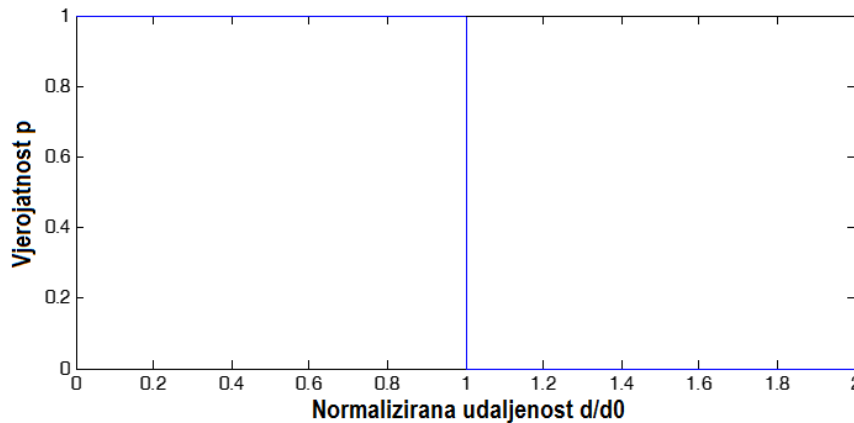
Slika 8.2. Povezanost mreže: a) nepovezana mreža, b) djelomična povezanost, c) potpuna povezanost

Na povezanost mreže najviše utječu parametri fizičkog sloja kao što su: osjetljivost radio-prijemnika, snaga radio-predajnika, dobitak antene te nepoželjne pojave kao *fading*, zasjenjivanja i sl., što obuhvaća radio propagaciju. Kada se koristi jednostavni model radio propagacije, snaga signala na prijemniku je obrnuto proporcionalna kvadratu udaljenosti između prijemnika i predajnika, čime su opisani gubici propagacije radio signala. Jedan od klasičnih modela jest model propagacije u slobodnom prostoru. S druge strane, realističniji model propagacije uzima u obzir i konfiguraciju terena, stoga se uvodi eksponent gubitka puta (engl. *path-loss-exponent*) koji opisuje uvjete propagacije signala (ima vrijednost između 2 i 6) i predstavlja pouzdaniji model propagacije [146]:

$$P_{RX} = P_{TX} \cdot k \cdot d^{-\alpha} \quad (8-8)$$

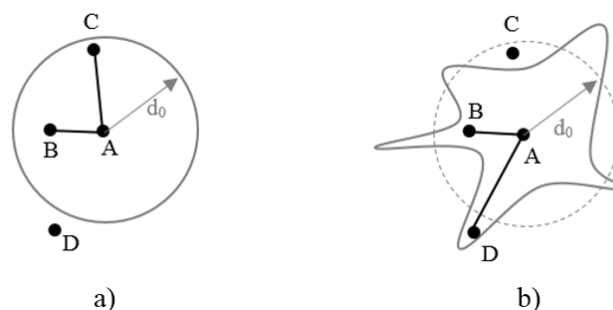
gdje je P_{RX} primljena snaga na prijemnoj strani, P_{TX} snaga odašiljača predajnog čvora, d udaljenost, α eksponent gubitka puta i k kombinirani koeficijent gubitka/dobitka. Iako ovaj model

predstavlja poboljšanje jednostavnog modela propagacije u slobodnom prostoru on i dalje pretpostavlja da čvorovi zrače jednakom količinom snage omnidirekcionalno te da je prijemna snaga uvijek jednaka srednjoj vrijednosti snage. Stoga, ukoliko je snaga na prijemu veća od osjetljivosti prijemnika komunikacija je moguća, dok u suprotnom slučaju komunikacija nije moguća. Ovaj model predstavlja funkciju vjerojatnosti uspješnog prijema signala kao skokovitu funkciju prikazanu na slici 8.3.



Slika 8.3. Vjerojatnost ispravnog prijema signala u ovisnosti o normiranoj udaljenosti

U ovom slučaju govori se o normiranoj udaljenosti $\frac{d}{d_0}$ gdje je d_0 udaljenost pri kojoj je razina prijemnog signala jednaka osjetljivosti prijemnika. Predloženi i poboljšani model i dalje ne opisuje stvarnu situaciju zbog činjenice da radio prijemnik nikada neće imati jednaku udaljenost komunikacije u svim smjerovima - omnidirekcionalnost. Razlog leži u radijskoj nepravilnosti (engl. *Radio irregularity*), što je uzrokovano zasjenjivanjem puta propagacije, *fading*-om, refleksijama, različitim pojačanjem antene u različitim smjerovima i drugim radijskim nepravilnostima. Spomenuto rezultira u nehomogenoj povezanosti čvora u različitim smjerovima (slika 8.4) [102, 136].



Slika 8.4. Domet komunikacije idealnog čvora a) (osnovni model propagacije) i realnog senzorskog čvora b) (Log-normalni model propagacije)

Ukoliko se pretpostavi da povezanost čvora u različitim smjerovima nije deterministička (slika

8.4a) nego je stohastička (slika 8.4b), moguće je predstaviti srodni model propagacije temeljen na vjerojatnosti, koji može značajno bolje predstaviti realnu povezanost čvora. Taj model naziva se Log-normalni model propagacije gdje se gubici propagacije procjenjuju kao [148]:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10 \cdot \alpha \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (8-9)$$

gdje je d_0 referentna udaljenost (udaljenost gubitka u slobodnom prostoru gdje je snaga na prijemnoj strani jednaka osjetljivosti prijemnika), α je eksponent gubitka puta, a X_σ je slučajna Gaussova varijabla (sa srednjom vrijednosti nula i standardnom devijacijom σ) koja predstavlja intenzitet zasjenjivanja puta propagacije izražene u dB . U tom slučaju, snaga signala na prijamniku jednaka je:

$$P_{RX}(d) = P_{TX} - PL(d) \quad (8-10)$$

U ovom trenutnom modelu dobitci antene i gubici su procijenjeni na 0 dB (izotropni radijator) no iste je moguće ugraditi u model koristeći jednadžbu (8-3).

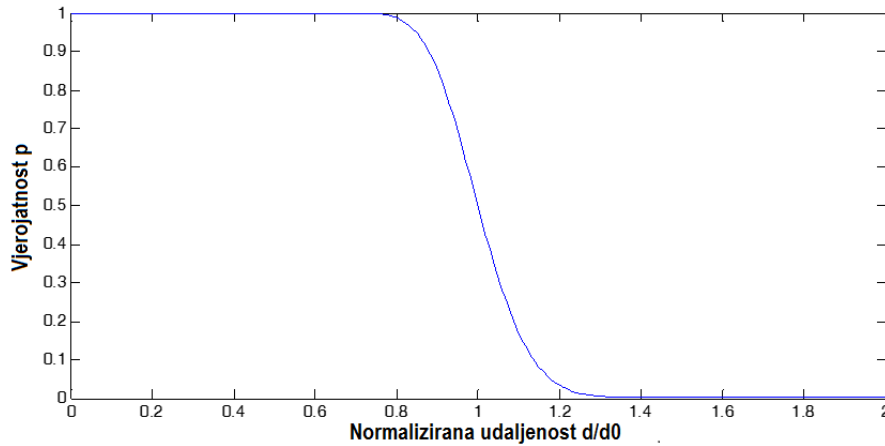
Ako se definira minimalna snaga signala γ koja mora biti raspoloživa na prijamniku za prijam signala (osjetljivost prijamnika), vjerojatnost da će snaga signala na prijemniku biti iznad vrijednosti γ se može definirati pomoću snage na prijemniku P_{RX} , vrijednosti γ i standardne devijacije zasjenjivanja σ . Vjerojatnost da je primljeni signal jači od osjetljivosti prijemnika, prema normalnoj razdiobi se može definirati kao [149]:

$$p[P_{RX} > \gamma] = Q\left[\frac{\gamma - P_{RX}(d)}{\sigma}\right] \quad (8-11)$$

gdje je funkcija Q definirana kao funkcija Gaussove normalne razdiobe [149]:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^\infty e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (8-12)$$

Poboljšani model propagacije postiže puno realniju situaciju kod vjerojatnosti ispravnog prijema signala nego jednostavni model propagacije. Uzimajući u obzir Log-normalni model propagacije funkcija vjerojatnosti ispravnog prijenosa signala u ovisno o normiranoj udaljenosti sada poprima oblik *erfc* funkcije, što je prikazano na slici 8.5.



Slika 8.5. Vjerojatnost ispravnog prijema signala u ovisnosti o normiranoj udaljenosti za Log-normalni propagacijski model

8.1.2. Gustoća postavljanja čvorova u velikim BSAM

U velikim BSAM izričito bitan parametar predstavlja gustoća postavljenih čvorova na promatranom području, zbog činjenice da se takve mreže često postavljaju probabilističkim metodama (npr. ispuštanjem čvorova iz aviona na određenom području) jedan od parametara na koji se može utjecati jest gustoća čvorova po km^2 definiran kao [22]:

$$\rho = \frac{N}{A} \quad (8-13)$$

gdje je N broj čvorova postavljenih na područje A . Za dovoljno veliko područje A i dovoljno velik broj čvorova N postavljanje je moguće definirati prema Poissonovoj razdiobi s gustoćom ρ [150]. Stoga, srednja vrijednost udaljenosti između dva čvora je izvedena iz gustoće postavljanja čvorova i Poissonove distribucije kao [40]:

$$d = \frac{1}{\sqrt{\rho}} \quad (8-14)$$

8.2. Simulacijski okvir za velike BSAM

Iz prethodnog poglavlja može se zaključiti kako je ostvarivanje povezanosti u velikim mrežama iznimno važno za uspješnu uspostavu komunikacije. Uvođenjem višekanalne arhitekture i višeodređišne topologije problem povezanosti postaje još izraženiji, zbog činjenice da se mreža segmentira na podmreže odijeljene različitim kanalima (što je opisano u prethodnim poglavljima). Stoga je iznimno važno ostvariti potpunu povezanost mreže i u velikim BSAM. Kako bi isto bilo omogu-

ćeno, predložen je scenarij simulacije gdje se ostvaruje potpuna povezanost mreže i simulira realan scenarij velike bežične senzorske i aktorske mreže.

S tim ciljem definiran je simulacijski okvir koji osigurava potpunu povezanost mreže. Predloženi simulacijski okvir prati opisani scenarij komunikacije sa višestrukim skokovima (opisan u poglavlju 6.5, gdje je izvršena simulacija mreže od 50 i 100 čvorova). Simulacijski okvir definira područje postavljanja čvorova, broj aktorskih čvorova u mreži te broj usmjerivača u mreži.

Mreža se sastoji od tri vrste čvorova:

1. **Aktorski čvorovi** - postavljeni su nasumično na promatranom području, i svaki aktorski čvor je aktivni (svaki čvor šalje upite). Ovim se ostvaruje simulacija u kritičnom scenariju kada mreža ostvaruje najlošije performanse.
2. **Usmjerivački čvorovi** - postavljeni su u formaciju mreže, $n \times n$ na promatranom području i služe kao okosnica (engl. *backbone*) pomoću koje se vrši prosljeđivanje podataka. U slučaju s više kanala u mreži, usmjerivači sami odabiru radni kanal tijekom inicijalizacije mreže, te isti ne mijenjaju tijekom rada.
3. **Krajnja odredišta u mreži** - postavljena su u centru mreže i njihov broj ovisi o broju kanala. Kako je i prije objašnjeno, u okviru ove disertacije pretpostavljeno je da je ukupni broj kanala u mreži jednak broju krajnjih odredišta u mreži. Time se omogućuje da svako krajnje odredište koristi drugi frekvencijski kanal.

Nadalje, definirani su parametri simulacije koji su prikazani u tablici 8.1.

Tablica 8.1. Parametri simulacije

Parametar	Vrijednost
Veličina promatranog područja	10 km x 10 km
Broj čvorova	200 - 1000
Model propagacije	Log-normalni
Rasipanje log-norm. modela [151] $\sigma_{logNorm}$	4 dB
Podsloj pristupu mediju	CSMA/CA
Protokol usmjeravanja	LWM
Osjetljivost prijemnika	-105 dBm
Snaga odašiljača	100 mW (20 dBm)
Broj kanala/krajnjih odredišta	2 do 5
Broj usmjerivača	mreža 10 x 10 = 100
Maksimalno vrijeme između slanja upita T_{max}	2 s - 100 s

Prema tablici 8.1 veličina promatranog područja postavljena je na vrijednost 10 km x 10 km.

Uzimajući u obzir radijus dometa novih generacija čvorova koji prema jednadžbi (8-7) iznosi 2,2 km, moguće je zaključiti kako je potrebno samo tri skoka kako bi se u postupnosti ostvarila veza, od središta do vrha/dna promatranog područja. U ovom simulacijskom okviru broj aktorskih čvorova iznosi od 200 do 1000 čvorova u mreži. Kako bi se ostvarila potpuna povezanost mreže pored aktorskih čvorova dodano je 100 usmjerivačkih čvorova, koji su postavljeni u mrežu 10×10 čvorova, na promatranom području. Isto tako, analiziran je različit broj kanala u mreži koji se kreće od dva do pet, zbog činjenice da je minimalni broj kanala za višekanalni protokol dva, dok je gornja granica odabrana proizvoljno.

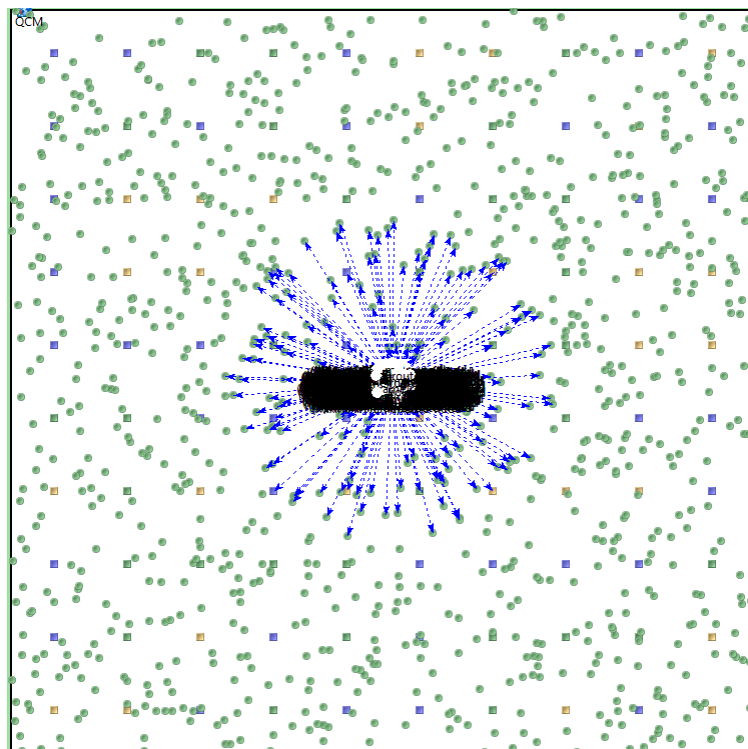
Prema tehničkoj specifikaciji dizajniranih senzorskih/aktorskih čvorova u eksperimentu, postavljeni su parametri radijskoga prijamnika na vrijednosti navedene u tablici 8.1 [83]. Isto tako, za protokol pristupu mediju i protokol usmjeravanja korišten je prije definiran LWM protokol, koji na podsloju pristupu mediju koristi CSMA/CA metodu i IEEE 802.15.4 standard. Na LWM protokol primijenjena je H-CLMC metoda za poboljšanje kvalitete usluge u BSAM, na isti način kao što je opisano u poglavlju 6.5 te su se analizirale performanse dobivenog H-CLMC protokola komunikacije.

Naposljetku, simulacija je napravljena za različite vrijednosti maksimalnog vremena između uzastopnih upita T_{max} , na temelju čega su dobiveni podatci o vjerojatnosti uspješnog upita. Treba napomenuti da zbog velikog broja čvorova u mreži vrijeme simulacije velikih mreža je iznimno veliko. Tako za simulaciju samo jedne vrijednosti T_{max} i 1000 aktivnih čvorova u mreži bilo je potrebno nekoliko desetaka sati, zbog čega se u ovom simulacijskom okruženju nije primjenjivalo višestruko ponavljanje svake točke simulacije.

Prikaz topologije simulacije s radijusom komunikacije krajnjeg odredišta u mreži (plave strelice) prikazan je na slici 8.6, dobiven pomoću OMNeT++ simulatora.

8.3. Prijedlog metode procjene kvalitete usluge temeljene na CQPS pokazatelju i vjerojatnosti uspješnog upita

Na temelju definiranog simulacijskog okvira moguće je provesti simulaciju velike BSAM sa sljedećim parametrima: Broj aktivnih aktora u mreži N_A , maksimalno vrijeme između uzastopnih upita T_{max} te broj kanala (krajnjih odredišta) C . Za svaku kombinaciju ovih parametara moguće je dobiti kao rezultat metriku kvalitete usluge u hibridnom modelu koordinacije, definirane u poglavlju 4.2. U navedenom poglavlju definiran je još jedan bitan pokazatelj u hibridnom modelu koordinacije a to je CQPS pokazatelj. On govori o ukupnom broju generiranih upita u mreži, u

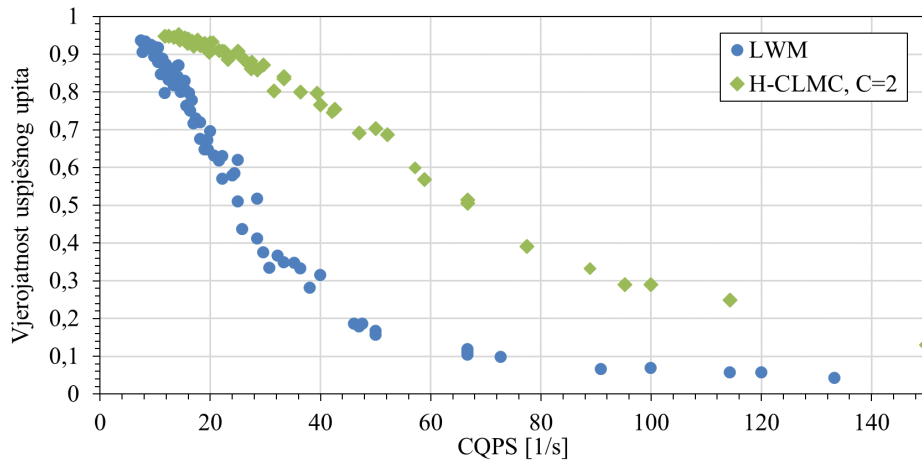


Slika 8.6. Topologija simulacije velike mreže s 1000 aktora i 100 usmjerivačkih čvorova

jedinici vremena. Sukladno tome, CQPS može na učinkoviti način zamijeniti parametre N_A i T_{max} prema prije definiranoj jednadžbi (4-8).

Stoga, moguće je prikazati dobivene metrike u ovisnosti o CQPS pokazatelju, što je prije objašnjeno u poglavlju 4.4.2. U tom slučaju mreža u hibridnom modelu koordinacije za različite kombinacije broja aktivnih čvorova u mreži i vremena T_{max} uvijek daje jednaku karakteristiku na dijagramu ovisnom o CQPS pokazatelju (primjer je slika 4.22a). Ovaj odnos se može vidjeti i u velikoj mreži (slika 8.7) gdje je prikazana karakteristika za osnovni LWM protokol i H-CLMC protokol. Podatci na dijagramu su dobiveni za različite kombinacije broja čvorova u mreži (od 200 do 1000) te različite kombinacije vremena T_{max} (od 2 s do 100 s), što rezultira jedinstvenom karakteristikom ovisnosti vjerojatnosti uspješnog upita o CQPS pokazatelju.

Iz dijagrama na slici 8.7 očito je kako predloženi H-CLMC ostvaruje značajno poboljšanje kvalitete usluge i u velikim BSAM, što je prije dokazano postupcima vrednovanja. Također, može se zaključiti kako se za predloženi H-CLMC protokol ocrta karakteristika ovisnosti vjerojatnosti uspješnog upita i CQPS pokazatelja. Ovo predstavlja preduvjet za definiranje empirijskog modela vjerojatnosti uspješnog upita u ovisnosti o CQPS pokazatelju. Kako CQPS pokazatelj uzima kao parametar broj aktivnih čvorova u mreži i vrijeme T_{max} , moguće je definirati uvjete koji moraju biti zadovoljeni kako bi vjerojatnost uspješnog upita bila veća od željene vrijednosti.



Slika 8.7. Vjerojatnost uspješnog upita za LWM i H-CLMC protokole u odnosu na CQPS, za C=2 krajnja odredišta u mreži

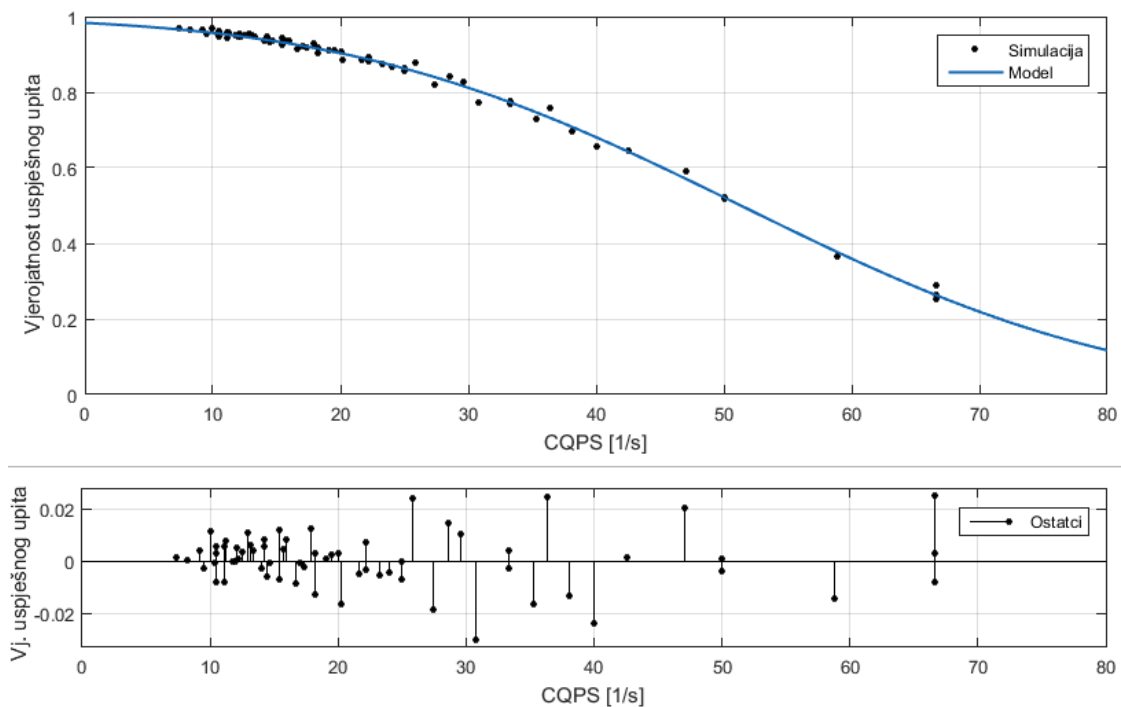
Ispunjavanjem uvjeta koji će ostvariti vjerojatnost uspješnog upita iznad željene razine, doći će i do smanjenja kašnjenja u mreži i povećanja kvalitete usluge, sukladno svim zaključcima ove disertacije.

Modeliranjem vjerojatnosti uspješnog upita moguće je procijeniti kvalitetu usluge u velikoj BSAM. Kako bi se omogućilo modeliranje vjerojatnosti uspješnog upita potrebno je pogledati srodne postupke iz literature gdje je empirijski modelirana vjerojatnost uspješnog primitka paketa p_{rr} . Tako u radovima [152, 153] autori govore o modeliranju vjerojatnosti primitka paketa pomoću odnosa signala i šuma u mreži, gdje se susreće upotreba Q funkcije (poznate i kao funkcija pogreške $erf(x)$) normalne Gaussove razdiobe). Autori u [154] vrše empirijsko modeliranje vjerojatnosti primitka podataka na temelju snage prijemnog signala, čime se pokazuje metodologija navedenog pristupa empirijskog modeliranja veličina. No u području bežičnih senzorskih i akterskih mreža ovaj pristup nije dovoljno raširen te se ne pronalaze pristupi u modeliranju vjerojatnosti primitka paketa.

Zbog činjenice da je u okviru ove disertacije predložen novi hibridni model koordinacije u BSAM u dostupnoj literaturi ne postoji pristup modeliranju vjerojatnosti uspješnog upita, što predstavlja glavnu metriku predloženog modela. Kako se u literaturi često susreće postupak empirijskoga modeliranja vjerojatnosti primitka paketa pomoću $erf()$ i $erfc()$ funkcija greške Gaussove distribucije, tako je isti postupak primijenjen na modeliranje vjerojatnosti uspješnog upita. Stoga se u velikoj BSAM vjerojatnost uspješnog upita p_q u ovisnosti o CQPS pokazatelju predlaže kao:

$$p_q = \frac{1}{2} \cdot \text{erfc}\left(\frac{CQPS - \mu}{\sigma}\right) \quad (8-15)$$

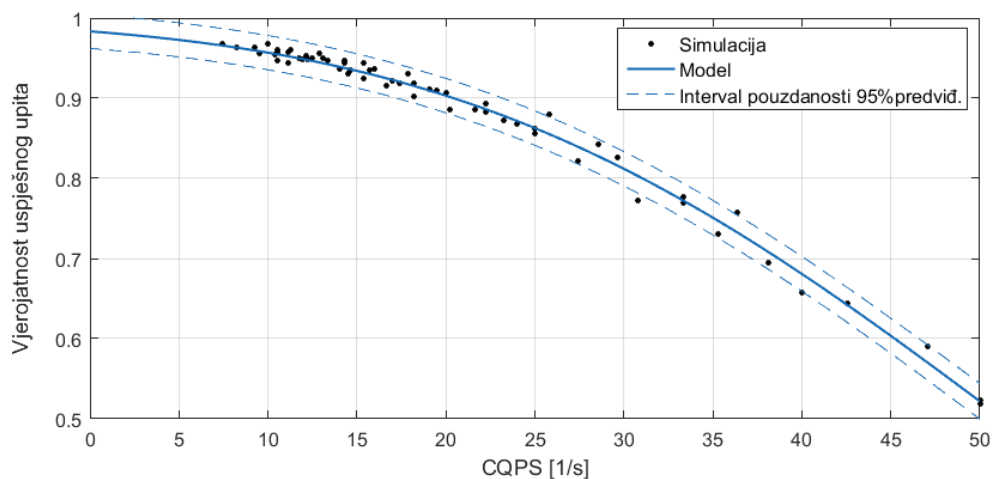
gdje su μ i σ empirijski određeni parametri. Ukoliko se primijeni postupak empirijskoga modeliranja parametara na temelju predloženog modela, za slučaj s dva krajnja odredišta u mreži (dijagram na slici 8.7) moguće je dobiti empirijski model vjerojatnosti uspješnog upita. Dobiveni empirijski model uz uzorke (točke) simulacije i ostatke modela (razlika između stvarnih podataka i modela) prikazani su na slici 8.8.



Slika 8.8. Dijagram modela vjerojatnosti uspješnog upita za $C=2$ krajnja odredišta u mreži uz uzorke dobivene simulacijom

Iz prikazanog modela i ostataka može se zaključiti kako je najmanje odstupanje modela za veće vjerojatnosti uspješnog upita (bliže vrijednosti 1) dok za manje vrijednosti vjerojatnosti uspješnog upita (veće vrijednosti CQPS) uviđa se rasipanje vrijednosti i povećanje odstupanja. Treba napomenuti da niti u jednom slučaju odstupanje modela ne iznosi više od 3 %. Iako je cilj što manje rasipanje vrijednosti između modela i uzoraka, ono što predstavlja prednost u ovom slučaju jest činjenica kako je cilj mreže ostvariti što veću vjerojatnost uspješnog upita, pri čemu se ostvaruje manje rasipanje vrijednosti. Stoga, ostvarivanjem veće vjerojatnosti uspješnog upita manja je i pogreška procjene modela. Stoga je moguće definirati interval pouzdanosti procjene vjerojatnosti uspješnog upita od 95 %, kao interval korišten u literaturi pri procjeni parametara [155]. Definirani interval procjene uz empirijski model i uzorke prikazan je na slici 8.9.

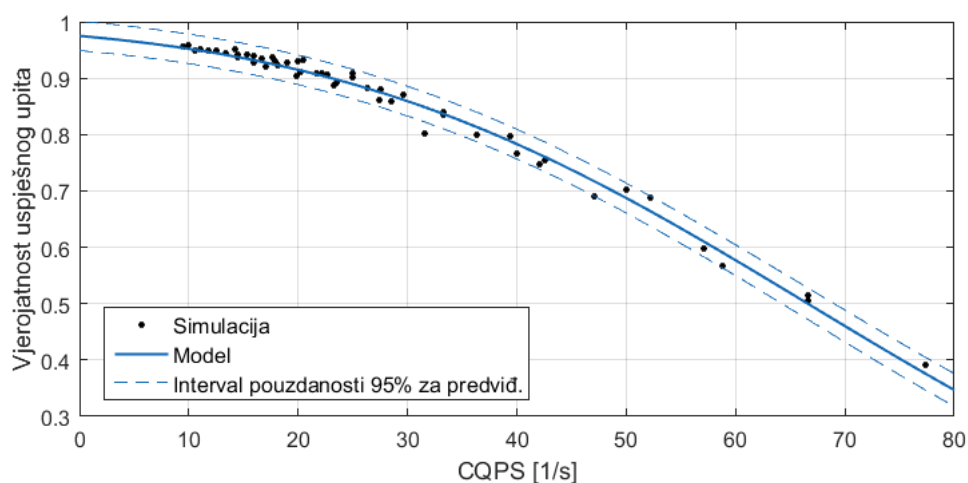
Kao što je prikazano na slici 8.9, za slučaj s dva krajnja odredišta u mreži definiran je empirijski model i interval pouzdanosti 95 % za predviđanje vjerojatnosti uspješnog upita iz CQPS vrijednosti



Slika 8.9. Dijagram modela vjerojatnosti uspješnog upita za C=2 krajnja odredišta u mreži i interval pouzdanosti 95 % za predviđanje vjerojatnosti uspješnog upita u velikim BSAM

mreže. Može se vidjeti kako je rasipanje vjerojatnosti za veće vjerojatnosti uspješnog upita malo, te da interval pouzdanosti ne odstupa više od $\pm 3\%$ od modela. Također, u ovom slučaju mreže s dva krajnja odredišta može se zaključiti da, npr. ukoliko se želi ostvariti vjerojatnost uspješnog upita veća od 90 %, prema intervalu pouzdanosti vrijednost CQPS pokazatelja za cijelu mrežu mora biti manja od 17 upita/s. U tom slučaju možemo s velikom vjerojatnošću reći da će biti ispunjeni gore navedeni uvjeti.

U slučaju povećanja broja krajnjih odredišta na tri, može se vidjeti kako je rasipanje vrijednosti oko modela nešto veće, no i dalje vrlo slično kao i u prethodnom slučaju (slika 8.10).

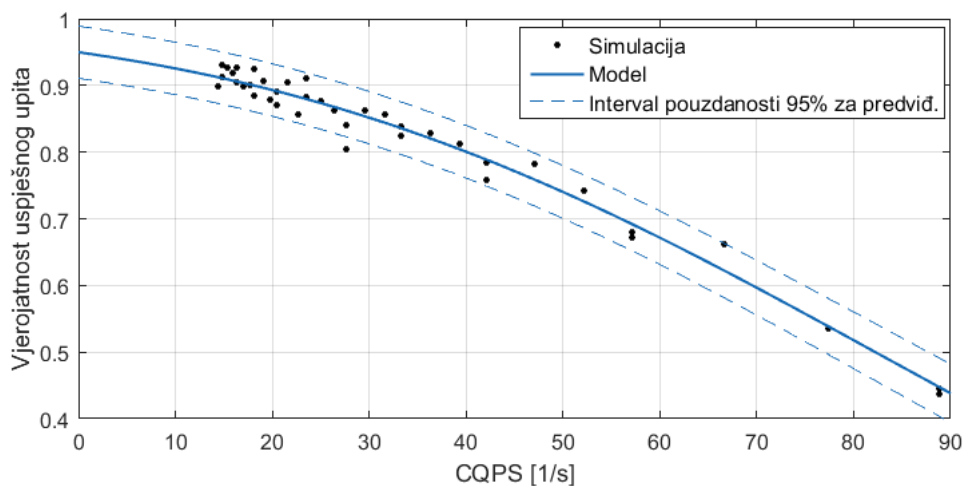


Slika 8.10. Dijagram modela vjerojatnosti uspješnog upita za C=3 krajnja odredišta u mreži i interval pouzdanosti 95% za predviđanje vjerojatnosti uspješnog upita u velikim BSAM

Ukoliko se promotri spomenuti dijagram može se zaključiti kako se dodavanjem dodatnog

kanala u mreži ne postiže značajno povećanje vjerojatnosti uspješnog upita, u gornjem području vjerojatnosti uspješnog upita. S druge strane, za veća zagušenja mreže (veće vrijednosti CQPS pokazatelja) ostvaruju se bolje performanse, tj. veća kvaliteta usluge. I u ovom slučaju za gore navedeni primjer, da bi se ostvarila vjerojatnost uspješnog upita veća od 90 % vrijednost CQPS pokazatelja mora biti manja od 17.

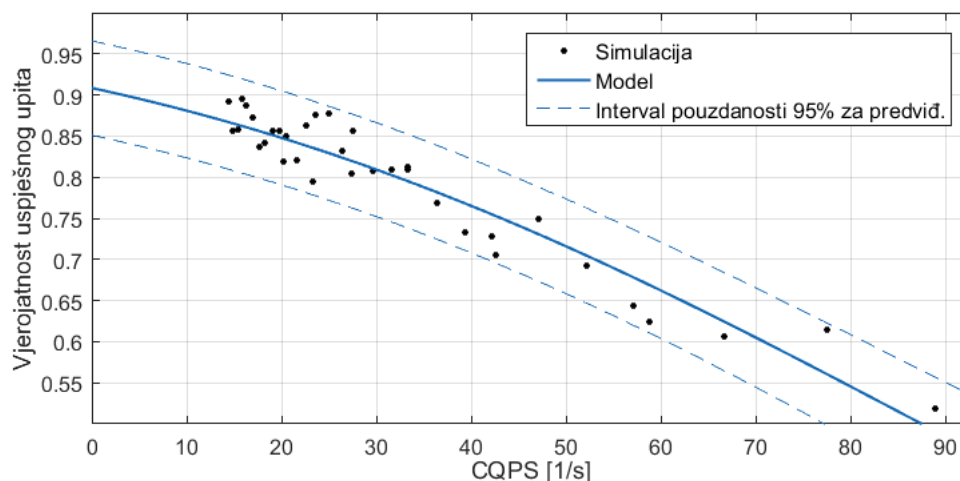
Nadalje, ista analiza provedena je i za slučaj s četiri krajnja odredišta u mreži. Model i interval pouzdanosti 95 % prikazan je na slici 8.11.



Slika 8.11. Dijagram modela vjerojatnosti uspješnog upita za C=4 krajnja odredišta u mreži i interval pouzdanosti 95 % za predviđanje vjerojatnosti uspješnog upita u velikim BSAM

U slučaju četiri krajnja odredišta može se vidjeti kako se rasipanje vrijednosti povećava čak i pri većim vrijednostima vjerojatnosti uspješnog upita. Ova pojava može se pripisati višekanalnom problemu skrivenog čvora, u uvjetima kad je mreža granično povezana. Zbog velikog broja kanala usmjerivači se raspodjeljuju na dostupne kanale, što može stvoriti otoke koji nemaju potpunu povezanost mreže na svim kanalima. Zbog toga se povećava i interval pouzdanosti procjene. Kako bi se ostvarila vjerojatnosti upita od 90 %, u ovom scenariju CQPS pokazatelj mora poprimiti vrijednost manju od 4. Ova pojava objašnjava kako samo povećanje broja kanala u mreži neće uvijek poboljšati kvalitetu usluge, te je potreban kompromis između utroška resursa (tj. povećanja broja usmjerivača u mreži) i povećanja kvalitete usluge. Slično se uočava i za slučaj s pet krajnjih odredišta u mreži, prikazan na slici 8.12.

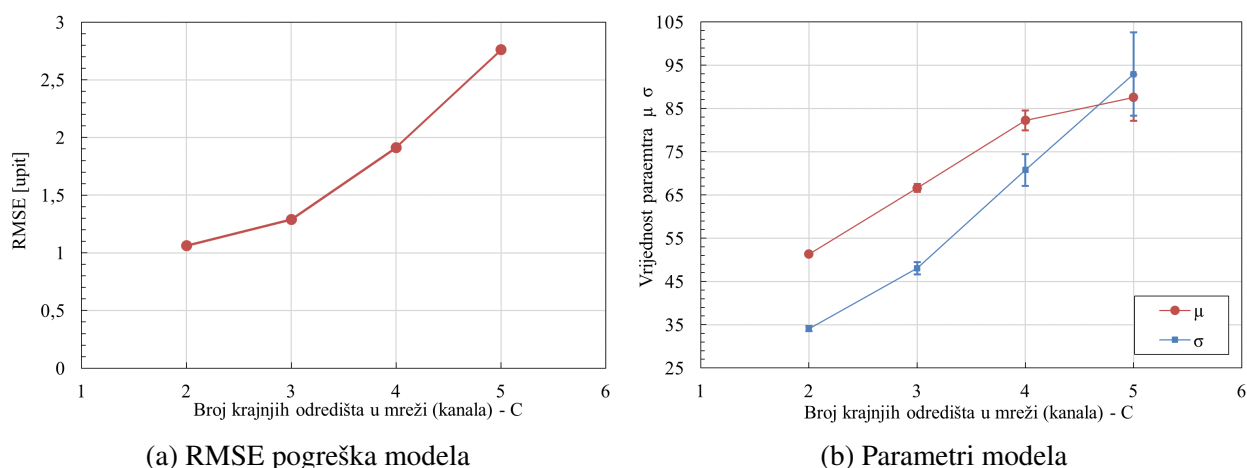
U ovom posljednjem scenariju problem višekanalne granične povezanosti mreže je još izraženiji, što rezultira velikim rasipanjem vrijednosti oko modela, te velikim odstupanjem. U ovom slučaju interval pouzdanosti je definiran kao više od 5 % razlike između modela, što u okviru CQPS pokazatelja rezultira jako velikim rasponom. Zbog ove činjenice, u scenariju s četiri krajnja



Slika 8.12. Dijagram modela vjerojatnosti uspješnog upita za $C=5$ krajnja odredišta u mreži i interval pouzdanosti 95 % za predviđanje vjerojatnosti uspješnog upita u velikim BSAM

odredišta u mreži ne možemo s velikom sigurnošću reći kolika vrijednosti CQPS pokazatelja mora biti da bi se ostvarila vjerojatnost uspješnog upita veća od 90 %, jer za vrijednosni $CQPS = 0$ model s intervalom pouzdanosti od 90 % ostvaruje vjerojatnost uspješnog upita od samo 0,85.

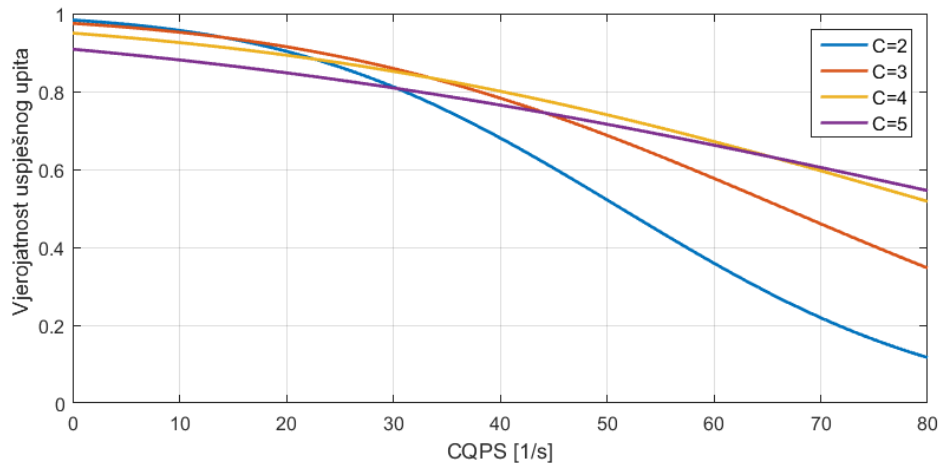
Zbog spomenutoga potrebno je odrediti optimalnu vrijednost broja kanala u mreži, koja može ostvariti maksimalno poboljšanje kvalitete usluge. Kako bi se odredila optimalna vrijednost treba sagledati ponašanje pogreške modela, izražene kroz RMSE metriku pogreške modela i modeliranih vrijednosti (prema jednadžbi 4-9). Dobivena srednja kvadratna pogreška u broju upita (za jedan čvor u mreži) prikazana je na slici 8.13a.



Slika 8.13. Prikaz pogreške modela i parametra model za različite vrijednosti broja krajnjih odredišta (kanala) u mreži

Iz prikazanog dijagrama može se zaključiti kako se povećanjem broja kanala u mreži povećava i RMSE pogreška modela, i to eksponencijalno (slika 8.13b). Za dva i tri kanala u mreži RSME

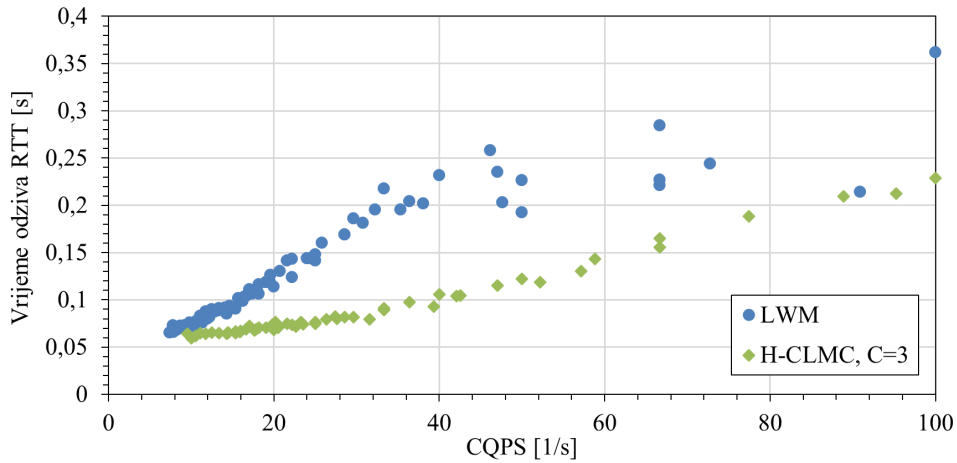
pogreška iznosi 1 i 1,3 upita (tj. 1 % i 1,3 % na 100 poslanih upita). Slika 8.13b prikazuje dijagram parametara μ i σ te interval pouzdanosti od 95 % za procjenu ovih parametara, na temelju broja kanala u mreži. I ovdje je očito kako je interval pouzdanosti za dva i tri kanala u mreži vrlo blizu srednje vrijednosti, do 2 %, dok se povećanjem broja kanala taj interval povećava na više od 10 %, za pet kanala u mreži. Ukoliko se pogleda prikaz modela za sve vrijednosti broja kanala u mreži (slika 8.14) moguće je uvidjeti gore spomenute probleme za veći broj kanala u mreži.



Slika 8.14. Model vjerojatnosti uspješnog upita za vrijednosti broja krajnjih odredišta u mreži

Povećanjem broja kanala u mreži događa se prije opisani problem smanjenja vjerojatnosti uspješnog upita za manje vrijednosti CQPS-a, zbog segmentacije mreže i pojavljivanja granične povezanosti mreže. U tom slučaju, iako se vjerojatnost uspješnog upita povećava u uvjetima jačeg zagušenja mreže, u uvjetima manjeg zagušenja mreže dolazi do degradacije kvalitete usluge. Stoga je moguće definirati optimalni broj krajnjih odredišta u mreži, uzimajući u obzir hibridni model koordinacije gdje se traži što veća pouzdanost komunikacije. Zbog činjenice da scenariji s dva i tri krajnja odredišta u mreži ostvaruju najbolje performanse u uvjetima manjeg zagušenja, dok scenarij s tri krajnja odredišta u mreži ostvaruje dobre performanse i u uvjetima jačeg zagušenja, scenarij s tri krajnja odredišta u mreži je odabran kao optimalni scenarij koji ostvaruje najveće poboljšanje kvalitete usluge u mreži. Ovo se može zaključiti i s dijagrama prikazanog na slici 8.15 gdje je prikazano vrijeme odziva za osnovni LWM protokol i za predloženi H-CLMC protokol s optimalnim brojem krajnjih odredišta u mreži ($C = 3$).

Iz prikazanog dijagrama moguće je zaključiti kako predloženi H-CLMC protokol ostvaruje smanjenje srednje vrijednosti vremena odziva, što uz poboljšanje vjerojatnosti uspješnog upita rezultira poboljšanjem kvalitete usluge u mreži. Kako bi se mogla procijeniti kvaliteta usluge potrebno je za dani iznos CQPS pokazatelja procijeniti vjerojatnost uspješnog upita i vrijeme odziva.



Slika 8.15. Srednja vrijednost vremena odziva za optimalni scenarij od tri krajnja odredišta u mreži u usporedbi s osnovnim LWM protokolom

Iz dijagrama prikazanog na slici 8.15 može se zaključiti kako vrijeme odziva ima dobro definiranu ovisnost o CQPS pokazatelju, stoga je moguće jednostavnom regresijom modelirati vrijeme odziva, i to kao polinom drugog stupnja [39, 156]. Dobiveni empirijski model vremena odziva t_{RTT} ima oblik:

$$t_{RTT}[ms] = 0,0009 \cdot CQPS^2 + 0,9 \cdot CQPS + 50 \quad (8-16)$$

Nadalje, potrebno je predložiti model vjerojatnosti uspješnog upita na temelju jednadžbe (8-15). Predloženi empirijski model vjerojatnosti uspješnog upita, za optimalni broj krajnjih odredišta u mreži ($C = 3$) za interval pouzdanosti od 95 % ima oblik:

$$p_q = \frac{1}{2} \cdot \text{erfc}\left(\frac{CQPS - 65,7}{49,51}\right) \quad (8-17)$$

Predloženim empirijskim modelima moguće je procijeniti kvalitetu usluge u velikim BSAM i hibridnom modelu koordinacije, uz primjenu predloženog H-CLMC protokola komunikacije i optimalnim brojem krajnjih odredišta u mreži ($C = 3$).

Kako bi se omogućila procjena realnih mreža potrebno je CQPS pokazatelj prikazati u obliku broja čvorova u mreži i vremena između slanja upita, kao što je prikazano u jednadžbi (4-8). Kako bi se omogućila realna primjena modela, umjesto korištene jednolike (uniformne) razdiobe vremena između slanja upita predloženo je korištenje srednje vrijednosti vremena između slanja upita T . Isto tako, zbog činjenice da je scenarij kad su svi čvorovi aktivni u mreži vrlo rijedak predlaže se uvođenje faktora aktivnih čvorova η . Stoga, vrijednost CQPS pokazatelja u velikim

mrežama se može izraziti kao:

$$CQPS = \frac{\eta \cdot N}{T} \quad (8-18)$$

gdje je η udio čvorova koji šalju upite (aktivnih čvorova), N ukupni broj aktorskih čvorova u mreži i T prosječno vrijeme između slanja dva upita u mreži. Danom relacijom moguće je procijeniti kvalitetu usluge u velikim BSAM na način da se na broj čvorova u mreži i prosječan udio aktivnih čvorova u mreži definira srednje vrijeme između upita, na temelju čega je moguće izračunati CQPS pokazatelj, te pomoću gore navedenih empirijskih modela vremena odziva i vjerojatnosti uspješnog upita, procijeniti kvalitetu usluge u velikoj BSAM.

8.4. Zaključak poglavlja

Pod pojmom velikih BSAM smatraju se mreže s velikim brojem čvorova i većim promatranim područjem, koje općenito sadrže više od 100 čvorova u mreži. U navedenim mrežama postavlja se pitanje može li se procijeniti kvaliteta usluge empirijskim modeliranjem mreže. Razlog odabira empirijskog modeliranja temeljen je na visokoj kompleksnosti simulacija velikih mreža koje su dugotrajne (do 10-ak sati za jedan scenarij), zahtijevaju mnogo računalnih resursa i kompleksnu konfiguraciju komunikacijskog protokola. Problematika procjene kvalitete usluge u velikim mrežama iznimno je kompleksna, stoga se u okviru ove disertacije predlaže osnovna metoda procjene kvalitete usluge u velikim BSAM i hibridnom modelu koordinacije, koja predstavlja osnovu budućeg istraživanja.

Ključni aspekti u prijedlogu metode procjene kvalitete usluge u velikim BSAM uključuju problem dometa komunikacija, modeliranje radijske komunikacije, korištenja odgovarajućeg modela propagacije te definiranja simulacijskog okvira koji će se koristiti u simulaciji velikih mreža. Definiran je simulacijski okvir koji osigurava potpunu povezanost mreže. Predloženi simulacijski okvir prati opisani scenarij komunikacije s višestrukim skokovima iz prethodnog poglavlja 6.5. Simulacijski okvir definira područje postavljanja čvorova, broj aktorskih čvorova u mreži te broj usmjerivača u mreži. Veličina promatranog područja postavljena je na vrijednost 10 km x 10km, a broj aktorskih čvorova iznosi od 200 do 1000. Pored aktorskih čvorova dodano je 100 usmjerivačkih čvorova. Simulacija je napravljena za različite vrijednosti maksimalnog vremena između uzastopnih upita T_{max} , na temelju čega su dobiveni podatci o vjerojatnosti uspješnog upita.

Predložena metoda za cilj ima procjenu kvalitete usluge na temelju empirijskog modela vjero-

jatnosti uspješnog upita i CQPS pokazatelja u BSAM i hibridnom modelu koordinacije. Osnova metode je činjenica kako u BSAM i hibridnom modelu koordinacije za različite kombinacije broja aktivnih čvorova u mreži i vremena T_{max} , uvijek se dobiva ista karakteristika na dijagramu ovisnom o CQPS pokazatelju. Sukladno navedenom, za predloženi H-CLMC dobiva se jedinstvena karakteristika ovisnosti vjerojatnosti uspješnog upita o CQPS pokazatelju. Ovo predstavlja preduvjet za definiranje empirijskog modela vjerojatnosti uspješnog upita u ovisnosti o CQPS pokazatelju pri čemu se modeliranjem vjerojatnosti uspješnog upita može procijeniti kvaliteta usluge u velikoj BSAM.

Iz predloženog modela može se zaključiti kako se najmanje odstupanje modela ostvaruje za veće vjerojatnosti uspješnog upita. Za manje vrijednosti vjerojatnosti uspješnog upita uviđa se rasipanje vrijednosti i povećanje odstupanja, ali niti u jednom slučaju odstupanje modela ne iznosi više od 3 %. Povećanjem broja kanala u mreži uočava se problem degradacije QoS-a za manje vrijednosti CQPS-a, zbog segmentacije mreže i pojavljivanja granične povezanosti mreže. U tom slučaju iako se kvaliteta usluge povećava u uvjetima jačeg zagušenja mreže, u uvjetima manjeg zagušenja mreže dolazi do degradacije kvalitete usluge. Zbog činjenice da scenarij s tri krajnja odredišta u mreži ostvaruje dobre performanse i u uvjetima jačeg zagušenja, scenarij s tri krajnja odredišta u mreži je odabran kao optimalni scenarij koji ostvaruje najveće poboljšanje kvalitete usluge u velikim BSM. Isto tako, predložen je empirijski model vremena odziva, za optimalni broj krajnjih odredišta u mreži pomoću kojega je moguće procijeniti kvalitetu usluge u velikim BSAM i hibridnom modelu koordinacije, uz primjenu predloženog H-CLMC protokola komunikacije.

Naposljetku, predložena je relacija pomoću koje je moguće procijeniti kvalitetu usluge u velikim BSAM na način da se na broj čvorova u mreži i prosječan udio aktivnih čvorova u mreži definira srednje vrijeme između upita. Na temelju definiranog vremena moguće je izračunati CQPS pokazatelj, te pomoću gore navedenih empirijskih modela vremena odziva i vjerojatnosti uspješnog upita, procijeniti kvalitetu usluge u velikoj BSAM.

9. ZAKLJUČAK

Razvojem mikroelektronike i novih generacija radioprijemnika razvija se i koncept bežičnih senzorskih mreža (BSM). Za razliku od klasičnoga koncepta bežične senzorske mreže koja periodički šalje podatke prema krajnjem odredištu (engl. *convergcasting*), BSM su se danas razvile u multifunkcionalne mreže koje sadrže veliki broj čvorova i autonomno obavljaju razne funkcije. Razvojem BSM-a u mreži se pojavljuju i aktorske (tj. djelatne) komponente (osim senzorskih tj. osjetilnih komponenata) pri čemu BSM prerastaju u bežične senzorske i aktorske mreže (BSAM). Samim razvojem BSAM-a pojavljuju se i nove primjene ovih mreža, pri čemu se BSAM počinju profilirati u području industrijske automatizacije. U tim primjenama pojavljuju se potrebe za velikom pouzdanošću, malim kašnjenjem i robusnošću na kvarove mreže. Pojavljuje se i potreba za kvalitetom usluge u BSAM čime se može jamčiti mali broj izgubljenih paketa i malo kašnjenje podataka u mreži.

Kako se razvojem BSAM pojavljuju nove primjene mreže, jedna od primjena uključuje komunikaciju orijentiranu na upit od strane aktorskog čvora. Ova primjena temelji se na činjenici da aktorski čvorovi šalju upite prema centru za obradu, očekujući odgovor na upit. Primjer se može pronaći u robotskim sustavima, taktičkim primjenama i sl., gdje roboti šalju upite o određenom postupku prema centru obrade i zahtijevaju odgovor na postavljeni upit u što kraćem vremenu. U tim uvjetima postavlja se pitanje ostvarivanja visoke pouzdanosti mreže i u slučaju kvarova mreže, što se ne može ostvariti primjenom postojećih modela koordinacije u BSAM.

Zbog navedenih nedostataka u okviru ove disertacije predložen je novi hibridni model koordinacije u BSAM za primjenu u stvarno-vremenskim komunikacijskim sustavima. Predloženi model temelji se na komunikaciji orijentiranoj na upit od strane aktorskog čvora u mreži. Aktorski čvor šalje upit u BSAM i očekuje odgovor na postavljeni upit. Upit se propagira kroz mrežu do krajnjeg odredišta u mreži, nakon čega se šalje na obradu izvan BSAM. Nakon obrade, odgovor na upit se prosljeđuje natrag izvorišnom čvoru kroz BSAM. Za predloženi model koordinacije definirane su metrike kvalitete usluge te je izvršeno eksperimentalno vrednovanje performansi predloženog modela na postojećim standardima i protokolima u BSAM. Iz inicijalnog eksperimenta može se zaključiti kako IEEE 802.15.4 protokol u načinu rada bez sinkronizacijskog impulsa ostvaruje daleko najlošije performanse, dok IEEE 802.15.4 u načinu rada sa sinkronizacijskim impulsom i LWM protokol ostvaruju gotovo jednake performanse. U usporedbi navedena dva protokola LWM protokol je odabran kao početni protokol za analizu kvalitete usluge u hibridnom modelu koor-

dinacije, zbog činjenice da po dizajnu omogućuje veću skalabilnost, te pruža otvoreni protokolni stog (engl. *open source*). Na temelju eksperimentalnog vrednovanja napravljeno je empirijsko modeliranje parametara mreže. Predložen je simulacijski model za odabrani protokol LWM. Isti je uspoređen s podacima iz eksperimenta koristeći RMSE metriku pri čemu se može zaključiti kako prosječno odstupanje simulacije od eksperimenta iznosi od 1,4 % do 2,5%, gdje se uočava trend smanjenja odstupanja pri povećanju broja čvorova u mreži. Ovo pokazuje dobre odlike skalabilnosti simulacijskog modela.

Na kraju poglavlja identificirani su problemi komunikacije u hibridnom modelu koordinacije, gdje je prikazan problem dijeljenog medija i uskog grla na strani krajnjeg odredišta u mreži. Ovi problemi se susreću pri jačem zagušenju mreže, pri čemu dolazi do odbacivanja paketa i degradacije performansi. Kako bi se utjecaj spomenutih problema na performanse mreže smanjio, predloženo je poboljšanje performansi mreže primjenom višeodredišne topologije i višekanalne arhitekture. Spomenutim metodama smanjuje se problem dijeljenog medija i zagušenja na jednom frekvencijskom kanalu u mreži (korištenjem višekanalne arhitekture) te problem uskog grla na krajnjem odredištu u mreži (korištenjem višeodredišne topologije).

Kako bi se omogućila višeodredišna topologija i višekanalna arhitektura potrebno je primijeniti protokole komunikacije koje odlikuju mogućnosti optimalnog dodjeljivanja (i promjene) kanala u mreži. Rezultat je smanjenje zagušenja trenutnog kanala i distribucija opterećenja na ostale dostupne kanale. U ovom dijelu disertacije prikazana su postojeća rješenja i metode dodjeljivanja kanala u višekanalnoj arhitekturi i višeodredišnoj topologiji. Opisane su osnove, problematika te protokoli predstavnici višekanalne arhitekture BSM i BSAM područja. Na temelju postojećih rješenja odabrane su dvije metode koje pokazuju dobra svojstva primjene na BSAM i hibridni model koordinacije. Spomenute metode su: ACS metoda, koja proizlazi iz ROD-SAN arhitekture te CONTROL metoda, koja proizlazi iz predloženog CONTROL protokola. ACS metoda odabrana je zbog činjenice da je predložena za upotrebu u BSAM, dok CONTROL metoda, iz grupe metoda za BSM, pokazuje dobra svojstva za primjenu u BSAM. Trenutni nedostaci postojećih metoda uključuju nemogućnost brze promjene kanala u slučaju kvara mreže. To u konačnici uzrokuje loše performanse i u mrežama koje nisu u kvaru, već imaju problem granične povezanosti. Zbog spomenutoga bilo je potrebno predložiti novu metodu dodjeljivanja kanala i novi protokol komunikacije.

Na temelju identificiranih problema predložena je inicijalna metoda za poboljšanje kvalitete usluge u mreži (CLMC) te je napravljena usporedba i vrednovanje postojećih metoda i nove me-

tode. U inicijalnoj CLMC metodi promjena kanala vrši se u slučaju kada je primljena informacija o neuspješnom slanju upita u mreži. Na temelju informacije o slanju upita u mreži stvara se procjena vjerojatnosti putem EWMA metode, na temelju čega se vrši stohastička promjena kanala, s vjerojatnošću p . Uvođenjem stohastičkog procesa promjene kanala omogućuje se bolja raspodjela broja čvorova po kanalima, što je pokazano u literaturi. Predložena CLMC metoda pokazuje dobre performanse u slučaju umjerenog zagušenja mreže, dok u slučaju jačeg zagušenja u mreži ostvaruje nešto lošije performanse. Razlog degradacije performansi se uočava u velikom broju promjena kanala u slučaju jačeg zagušenja, što smanjuje učinkovitost predložene metode.

Nakon identificiranja nedostataka inicijalno predložene CLMC metode predložena je nova metoda i protokol komunikacije za poboljšanje kvalitete usluge u BSAM i hibridnom modelu koordinacije. Nova metoda je nazvana H-CLMC metoda, koja predlaže vremensko zadržavanje promjene kanala temeljeno na procijenjenoj vrijednosti vremena odziva iz EWMA estimatora vremena odziva. Pomoću CQPS pokazatelja (dobivenog putem mrežnog ACK paketa) čvorovi dobivaju informaciju o globalnom zagušenju trenutnog kanala te se na temelju spomenute informacije poboljšava donošenje odluke o promjeni kanala. Na sličan način kao i kod CLMC metode definira se EWMA estimator vjerojatnosti promjene kanala te se promjena kanala vrši s vjerojatnošću p . Predloženi protokol vrednovan je metodom simulacije, u scenarijima bez i s usmjeravanjem, s različitim brojem čvorova u mreži (od 10 do 50). U scenariju vrednovanja predloženog protokola u mreži s jednim skokom (metodom simulacije) donesen je zaključak kako predloženi H-CLMC protokol ostvaruje bolju kvalitetu usluge u usporedbi s protokolima iz literature. Predloženi protokol ostvaruje najveće poboljšanje kvalitete usluge u odnosu na LWM protokol od 39 % - 44 % u slučaju s dva kanala, te od 47 % do 56 % u slučaju tri kanala u mreži. S druge strane, u scenariju s usmjeravanjem, oba predložena protokola ostvaruju vrlo slične rezultate, koji predstavljaju unapređenje od rezultata metoda predloženih u literaturi (ACS i CONTROL). Ovim vrednovanjem zaključeno je kako predloženi CLMC i H-CLMC protokoli ostvaruju puno bolje performanse u uvjetima granične povezanosti mreže u usporedbi s protokolima iz literature, koji uzrokuju degradaciju kvalitete usluge. Na temelju provedenog istraživanja može se zaključiti kako su predložena rješenja bolja i u uvjetima kad nastanu kvarovi u dijelovima mreže, jer omogućuju brzu promjenu kanala te brz oporavak dijela mreže.

Sukladno simulaciji provedeno je i eksperimentalno vrednovanje predloženog protokola komunikacije u laboratorijskim uvjetima. Vrednovanjem je pokazano kako podatci iz simulacije dobro opisuju provedeni eksperiment te H-CLMC protokol ostvaruje najbolje performanse u scenariju

bez usmjeravanja. U scenariju s usmjeravanjem (50 aktivnih čvorova u mreži) CLMC i H-CLMC protokoli pokazuju podjednake performanse, dok H-CLMC ostvaruje neznatno bolje performanse. Oba protokola ostvaruju bolje performanse nego protokoli iz literature. Treba napomenuti kako postoje razlike između eksperimenta i simulacije u vrijednostima vjerojatnosti uspješnog upita i vremenu odziva, koje su najviše izražene u području umjerenog zagušenja mreže. U tim uvjetima eksperiment postiže manje vrijednosti vjerojatnosti uspješnog upita nego simulacija. Razlike u vjerojatnosti uspješnog upita uviđaju se i u području jakog zagušenja, što se može pripisati nepredvidljivosti same mreže. Najizraženiji problem usporedbe simulacije i eksperimenta nastaje kod metrike vremena odziva, pri čemu se u eksperimentu se postižu vrijednosti vremena odziva koje su podosta veće nego u simulaciji. Ovo se može pripisati problemom modeliranja stvarnog sklopovlja koristeći simulator temeljen na diskretnim događajima (OMNeT++). U tim uvjetima iznimno je teško modelirati vremena izvođenja algoritama, što za rezultat daje veća kašnjenja i veća vremena odziva eksperimenta. Iako odstupanja eksperimenta i simulacije postoje, bitan aspekt predstavlja sljedivost simulacije i eksperimenta, što je potvrđeno ovim eksperimentalnim vrednovanjem. Ovaj aspekt je vrlo bitan jer iako nije moguće točno procijeniti vrijednosti metrika moguće je procijeniti međusobne interakcije parametara mreže u određenim uvjetima, kao npr. činjenica da povećanje vjerojatnosti uspješnog upita smanjuje vrijeme odziva.

Naposljetku, u disertaciji se proučava mogućnost procjene kvalitete usluge u velikim BSAM i hibridnom modelu koordinacije, gdje se pod pojmom velikih BSAM smatraju se mreže koje sadrže više od 100 čvorova. Kako je problematika procjene kvalitete usluge u velikim mrežama iznimno kompleksna, u okviru ove disertacije predložena je osnovna metoda procjene kvalitete usluge u velikim BSAM i hibridnom modelu koordinacije, koja predstavlja osnovu budućeg istraživanja. Ključni aspekti u prijedlogu metode procjene kvalitete usluge u velikim BSAM uključuju problem dometa komunikacija, modeliranje radijske komunikacije, korištenje odgovarajućeg modela propagacije te definiranje simulacijskog okvira koji će se koristiti u simulaciji velikih mreža. Nakon definiranja problematike velikih BSAM opisan je simulacijski okvir te parametri simulacije. Predložena metoda procjene kvalitete usluge temeljena je na empirijskom modelu ukupnog broja upita u cijeloj mreži, u jedinici vremena (CQPS) i vjerojatnosti uspješnog upita. Metoda je osmišljena na temelju činjenice kako u BSAM i hibridnom modelu koordinacije za različite kombinacije broja aktivnih čvorova u mreži i vremena T_{max} , uvijek se dobiva ista karakteristika na dijagramu ovisnom o CQPS pokazatelju, za H-CLMC protokol. Ovo je preduvjet za definiranje empirijskog modela vjerojatnosti uspješnog upita. Iz predloženog modela može se zaključiti kako se najmanje

odstupanje modela ostvaruje za veće vjerojatnosti uspješnog upita. Povećanjem broja kanala u mreži pojavljuje se problem degradacije QoS-a za manje vrijednosti CQPS pokazatelja, stoga se postavlja pitanje optimalnog broja kanala u velikim BSAM. Kako scenarij s tri krajnja odredišta u mreži ostvaruje dobre performanse i u uvjetima jačeg zagušenja, isti je odabran kao optimalni scenarij koji ostvaruje najveće poboljšanje kvalitete usluge u velikim BSAM i predloženom H-CLMC protokolu. Naposljetku, predložen je empirijski model vremena odziva (za optimalni broj krajnjih odredišta u mreži) koji omogućuje procjenu kvalitete usluge u velikim BSAM i hibridnom modelu koordinacije, uz primjenu predloženog H-CLMC protokola.

Buduće istraživanje iziskuje rješavanje preostalih otvorenih problema iz područja istraživanja. Tu se najviše ističe problem protokola usmjeravanja tj. utjecaja protokola usmjeravanja na kvalitetu usluge u BSAM i hibridnom modelu koordinacije. Kako je zaključeno u uvodu disertacije, protokol usmjeravanja ima značajan utjecaj na kvalitetu usluge, stoga ostaje problem prilagodbe protokola usmjeravanja višeodredišnoj topologiji i višekanalnoj arhitekturi, s ciljem dodatnog poboljšanja kvalitete usluge. Ovo je posebno istaknuto u slučaju nastalog kvara u mreži kada protokol usmjeravanja mora uspostaviti nove puteve u mreži, koristeći različite kanale. Nadalje, otvoren je i istraživački problem procjene kvalitete usluge u velikim BSAM s većom pouzdanošću. U okviru ove disertacije predložen je općeniti model procjene kvalitete usluge u velikim BSAM, dok bi za daljnje unaprjeđenje trebalo izvršiti detaljno vrednovanje predloženog modela te omogućiti procjenu kvalitete usluge na temelju više parametara u mreži.

Naposljetku, pojavljuju se mogućnosti integracija BSAM sa novim tehnologijama koje koriste arhitekturu lanca blokova (engl. *Blockchain*), pri čemu se omogućuje povećanje pouzdanosti i perzistencije podataka koji se čuvaju u distribuiranim instancama glavne knjige (engl. *Distributed ledger*), na velikom broju čvorova u mreži. Ovom arhitekturom omogućuju se diferencijacija kvalitete usluge, visoka pouzdanost pohrane podataka, visoka pouzdanost obrade podataka i nemogućnost manipulacije podacima zbog kriptografske naravi arhitekture lanca blokova. Također, pojavom koncepta "pametnih ugovora" (engl. *Smart Contract*) moguće je vršiti obradu podataka i izvođenje specifičnih algoritama u samom lancu blokova, bez potrebe za centraliziranim poslužiteljem, što predstavlja novi koncept u odnosu na klasične računalne sustave, čime se otvara mogućnost novim aplikacijama i primjenama koje u prošlosti nisu bile moguće.

Literatura

- [1] Sohraby, K., Minoli, D., Znati, T., *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*, John, (ur.). Wiley Publishing, 2007, dostupno na: <http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0471743003.html>
- [2] Kuorilehto, M., Kohvakka, M., Suhonen, J., Hamalainen, P., Hannikainen, M., Hamalainen, T. D., *Ultra-Low Energy Wireless Sensor Networks in Practice: Theory, Realization and Deployment*. Wiley Publishing, 2008.
- [3] Li, X., *Wireless Ad Hoc and Sensor Networks: Theory and Applications*, ser. *Wireless Ad Hoc and Sensor Networks: Theory and Applications*. Cambridge University Press, 2008, dostupno na: <http://books.google.hr/books?id=U0aBeui4hI8C>
- [4] Wang, Y., Vuran, M. C., Goddard, S., “Stochastic analysis of energy consumption in wireless sensor networks”, in *Sensor Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, 2010 7th Annual IEEE Communications Society Conference on, 2010, str. 1-9.
- [5] Chen, Y., Zhao, Q., “On the lifetime of wireless sensor networks”, *Communications Letters, IEEE*, Vol. 9, No. 11, 2005, str. 976-978.
- [6] Radi, M., Dezfouli, B., Bakar, K. A., Lee, M., “Multipath routing in wireless sensor networks: Survey and research challenges”, *Sensors*, Vol. 12, No. 1, 2012, str. 650–685, dostupno na: <http://www.mdpi.com/1424-8220/12/1/650>
- [7] Vullers, R., van Schaijk, R., Doms, I., Hoof, C. V., Mertens, R., “Micropower energy harvesting”, *Solid-State Electronics*, Vol. 53, No. 7, 2009, str. 684 - 693, <ce:title>Papers Selected from the 38th European Solid-State Device Research Conference – ESSDERC’08</ce:title>, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038110109000720>
- [8] Srivastava, N., “Challenges of next-generation wireless sensor networks and its impact on society”, *CoRR*, Vol. abs/1002.4680, 2010.
- [9] Nef, M.-A., Perlepes, L., Karagiorgou, S., Stamoulis, G. I., Kikiras, P. K., “Enabling qos in the internet of things”, in *CTRQ 2012, The Fifth International Conference on Communication Theory, Reliability, and Quality of Service*, 2012, str. 33–38.
- [10] Bandyopadhyay, D., Sen, J., “Internet of things: Applications and challenges in technology and standardization”, *CoRR*, Vol. abs/1105.1693, 2011.
- [11] Uthra, R. A., Raja, S. V. K., “Qos routing in wireless sensor networks —a survey”, *ACM Comput. Surv.*, Vol. 45, No. 1, Dec. 2012, str. 9:1–9:12.

- [12] Bhuyan, B., Sarma, H., Sarma, N., Kar, A., Mall, R., “Quality of service (qos) provisions in wireless sensor networks and related challenges”, *Wireless Sensor Network*, Vol. Vol. 2 No. 11, 2010.
- [13] Li, Y., Chen, C. S., Song, Y.-Q., Wang, Z., “Real-time QoS support in wireless sensor networks: a survey”, in *7th IFAC International Conference on Fieldbuses & Networks in Industrial & Embedded Systems - FeT’2007*, Toulouse, France, 2007, dostupno na: <http://hal.inria.fr/inria-00188265>
- [14] Mogre, P., Hollick, M., Steinmetz, R., “Qos in wireless mesh networks: Challenges, pitfalls, and roadmap to its realization”, in *Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV 2007)*. ACM, Jun 2007.
- [15] Chen, D., Varshney, P. K., “Qos support in wireless sensor networks: A survey.”, in *International Conference on Wireless Networks*, Vol. 233, 2004.
- [16] M. Aykut Yigitel, C. E., O. Durmaz Incel, “Qos-aware mac protocols for wireless sensor networks: A survey”, *Computer Networks*, Vol. 55, No. 8, 2011, str. 1982 - 2004, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128611000703>
- [17] Gavrilovska, L., “Cross-layering approaches in wireless ad hoc networks”, *Wireless Personal Communications*, Vol. 37, No. 3-4, 2006, str. 271-290, dostupno na: <http://dx.doi.org/10.1007/s11277-006-9071-4>
- [18] García Villalba, L. J., Sandoval Orozco, A. L., Triviño Cabrera, A., Barenco Abbas, C. J., “Routing protocols in wireless sensor networks”, *Sensors*, Vol. 9, No. 11, 2009, str. 8399–8421, dostupno na: <http://www.mdpi.com/1424-8220/9/11/8399>
- [19] Yang, X., Jia, J., Zhang, S., Li, Z., “Congestion control based on consensus in the wireless sensor network”, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Vol. 2013, 2013, dostupno na: <http://www.dx.doi.org/10.1155/2013/632398>
- [20] Karl, H., Willig, A., *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, 2005.
- [21] Xu, K., Hassanein, H., Takahara, G., Wang, Q., “Relay node deployment strategies in heterogeneous wireless sensor networks: single-hop communication case”, in *Global Telecommunications Conference, 2005. GLOBECOM ’05. IEEE*, Vol. 1, 2005, str. 5 pp.-.
- [22] Younis, M., Akkaya, K., “Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks: A survey”, *Ad Hoc Networks*, Vol. 6, No. 4, 2008, str. 621 - 655, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870507000984>
- [23] Ahlberg, M., Vlassov, V., Yasui, T., “Router placement in wireless sensor networks”, in *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2006 IEEE International Conference on*, 2006, str. 538-541.
- [24] Li, C., Zhang, H., Hao, B., Li, J., “A survey on routing protocols for large-scale wireless sensor networks”, *Sensors*, Vol. 11, No. 4, 2011, str. 3498–3526, dostupno na: <http://www.mdpi.com/1424-8220/11/4/3498>

- [25] Ali, K. A., Mouftah, H. T., “Wireless personal area networks architecture and protocols for multimedia applications”, *Ad Hoc Netw.*, Vol. 9, No. 4, Jun. 2011, str. 675–686, dostupno na: <http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2010.09.006>
- [26] RAVI, M., “Qos with security in wireless multimedia sensor networks”, *IRACST – International Journal of Computer Networks and Wireless Communications (IJCNWC)*, 2012.
- [27] Xia, F., “Qos challenges and opportunities in wireless sensor/actuator networks”, *Sensors*, Vol. 8, No. 2, 2008, str. 1099–1110, dostupno na: <http://www.mdpi.com/1424-8220/8/2/1099>
- [28] Yick, J., Mukherjee, B., Ghosal, D., “Wireless sensor network survey”, *Comput. Netw.*, Vol. 52, No. 12, Aug. 2008, str. 2292–2330, dostupno na: <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2008.04.002>
- [29] Bayoumi, M., “Wireless sensor networks: a new communication paradigm”, in *Emerging Technologies: Circuits and Systems for 4G Mobile Wireless Communications*, 2005. ETW '05. 2005 IEEE 7th CAS Symposium on, 2005, str. 19-.
- [30] Tilak, S., Abu-Ghazaleh, N. B., Heinzelman, W., “A taxonomy of wireless micro-sensor network models”, *ACM MOBILE COMPUTING AND COMMUNICATIONS REVIEW*, Vol. 6, 2002, str. 28–36.
- [31] Yigitel, M. A., Incel, O. D., Ersoy, C., “Design and implementation of a qos-aware {MAC} protocol for wireless multimedia sensor networks”, *Computer Communications*, Vol. 34, No. 16, 2011, str. 1991 - 2001, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366411001927>
- [32] Afsar, M. M., Tayarani-N, M.-H., “Clustering in sensor networks”, *J. Netw. Comput. Appl.*, Vol. 46, No. C, Nov. 2014, str. 198–226.
- [33] Culler, D., Estrin, D., Srivastava, M., “Guest editors’ introduction: Overview of sensor networks”, *Computer*, Vol. 37, No. 8, 2004, str. 41-49.
- [34] Christin, D., Reinhardt, A., Mogre, P., Steinmetz, R., “Wireless sensor networks and the internet of things: Selected challenges”, in *Proceedings of the 8th GI/ITG KuVS Fachgespräch Drahtlose Sensornetze*, Hamburg, Germany, Institut für Telematik, T. U. H.-H., (ur.), Aug 2009, str. 31–34, dostupno na: <http://doku.b.tu-harburg.de/volltexte/2009/581/pdf/proceedings.pdf>
- [35] Ismail, M. F. F. B., Yie, L. W., “Acoustic monitoring system using wireless sensor networks”, *Procedia Engineering*, Vol. 41, No. 0, 2012, str. 68 - 74, <ce:title>International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors 2012 (IRIS 2012)</ce:title>, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812025301>
- [36] Pinedo-Frausto, E., Garcia-Macias, J., “An experimental analysis of zigbee networks”, in *Local Computer Networks*, 2008. LCN 2008. 33rd IEEE Conference on, Oct 2008, str. 723-729.
- [37] Galluzzi, V., Herman, T., “Survey: Discovery in wireless sensor networks.”, *IJDSN*, Vol. 2012, 2012.

- [38] Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., Balakrishnan, H., “Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks”, in Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences-Volume 8 - Volume 8, ser. HICSS '00. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2000, str. 8020–.
- [39] Horvat, G., Sostaric, D., Žagar, D., “Response surface methodology based power consumption and rf propagation analysis and optimization on xbee wsn module”, Telecommunication Systems, 2014, str. 1-16, dostupno na: <http://dx.doi.org/10.1007/s11235-014-9904-5>
- [40] Poe, W. Y., Schmitt, J. B., “Node deployment in large wireless sensor networks: Coverage, energy consumption, and worst-case delay”, in Asian Internet Engineering Conference, ser. AINTEC '09. New York, NY, USA: ACM, 2009, str. 77–84, dostupno na: <http://doi.acm.org/10.1145/1711113.1711127>
- [41] Cheng, G. J., Liu, L. T., Qiang, X. J., Liu, Y., “Industry 4.0 development and application of intelligent manufacturing”, in 2016 International Conference on Information System and Artificial Intelligence (ISAI), June 2016, str. 407-410.
- [42] Shah, G., Bozyiğit, M., Akan, z., Baykal, B., “Real-time coordination and routing in wireless sensor and actor networks”, in Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking, ser. Lecture Notes in Computer Science, Koucheryavy, Y., Harju, J., Iversen, V., (ur.). Springer Berlin Heidelberg, 2006, Vol. 4003, str. 365-383, dostupno na: http://dx.doi.org/10.1007/11759355_34
- [43] Akyildiz, I. F., Kasimoglu, I. H., “Wireless sensor and actor networks: research challenges”, Ad Hoc Networks, Vol. 2, No. 4, 2004, str. 351 - 367.
- [44] Xia, F., “Qos challenges and opportunities in wireless sensor/actuator networks”, Sensors, Vol. 8, No. 2, 2008, str. 1099, dostupno na: <http://www.mdpi.com/1424-8220/8/2/1099>
- [45] Chen, J., Díaz, M., Llopis, L., Rubio, B., Troya, J. M., “A survey on quality of service support in wireless sensor and actor networks: Requirements and challenges in the context of critical infrastructure protection”, Journal of Network and Computer Applications, Vol. 34, No. 4, 2011, str. 1225 - 1239, advanced Topics in Cloud Computing, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804511000257>
- [46] Salarian, H., Chin, K.-W., Naghdy, F., “Coordination in wireless sensor–actuator networks: A survey”, Journal of Parallel and Distributed Computing, Vol. 72, No. 7, 2012, str. 856 - 867, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0743731512000573>
- [47] Ahmed, A. A., Latiff, L. A., Sarijari, M. A., Fisal, N., “Real-time routing in wireless sensor networks”, in ICDCS Workshops, 2008, str. 114-119.
- [48] Zeng, Y., Sreenan, C., Zheng, G., “A real-time architecture for automated wireless sensor and actuator networks”, in Wireless and Mobile Communications, 2009. ICWMC '09. Fifth International Conference on, Aug 2009, str. 1-6.
- [49] Crawley, E., Nair, R., Rajagopalan, B., Sandick, H., “A framework for qos-based routing in the internet”, RFC, Tech. Rep., 1998.

- [50] Vogel, A., Kerhervé, B., Bochmann, G. v., Gecsei, J., “Distributed multimedia applications and quality of service: a survey”, in Proceedings of the 1994 conference of the Centre for Advanced Studies on Collaborative research, ser. CASCON '94. IBM Press, 1994, str. 71–, dostupno na: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=782185.782256>
- [51] Chen, J., “A dependable middleware for the development of applications for wireless sensor and actor networks”, in Proceedings of the 13th International Conference on Ubiquitous Computing, ser. UbiComp '11. New York, NY, USA: ACM, 2011, str. 535–538, dostupno na: <http://doi.acm.org/10.1145/2030112.2030200>
- [52] Chen, J., Díaz, M., Rubio, B., Troya, J. M., “Ps-quasar: A publish/subscribe qos aware middleware for wireless sensor and actor networks”, *Journal of Systems and Software*, Vol. 86, No. 6, 2013, str. 1650 - 1662, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0164121213000502>
- [53] Ye, W., Heidemann, J., Estrin, D., “An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks”, in INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE, Vol. 3, 2002, str. 1567-1576 vol.3.
- [54] Lu, G., Krishnamachari, B., Raghavendra, C. S., “An adaptive energy-efficient and low-latency mac for data gathering in wireless sensor networks”, in 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2004. Proceedings., April 2004, str. 224-.
- [55] Ergen, S. C., Varaiya, P., “Pedamacs: power efficient and delay aware medium access protocol for sensor networks”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 5, No. 7, July 2006, str. 920-930.
- [56] Rhee, I., Warrier, A., Aia, M., Min, J., Sichitiu, M. L., “Z-mac: A hybrid mac for wireless sensor networks”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 16, No. 3, June 2008, str. 511-524.
- [57] Gutierrez, J. A., Callaway, E. H., Barrett, R., *IEEE 802.15.4 Low-Rate Wireless Personal Area Networks: Enabling Wireless Sensor Networks*. New York, NY, USA: IEEE Standards Office, 2003.
- [58] Saxena, N., Roy, A., Shin, J., “Dynamic duty cycle and adaptive contention window based qos-mac protocol for wireless multimedia sensor networks”, *Computer Networks*, Vol. 52, No. 13, 2008, str. 2532 - 2542, (1) Research and Trials for Reliable VoIP Applications(2) Wireless Multimedia Sensor Networks, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128608001849>
- [59] Kim, H., Min, S.-G., “Priority-based qos mac protocol for wireless sensor networks”, in 2009 IEEE International Symposium on Parallel Distributed Processing, May 2009, str. 1-8.
- [60] Liu, Y., Elhanany, I., Qi, H., “An energy-efficient qos-aware media access control protocol for wireless sensor networks”, in IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, 2005., Nov 2005, str. 3 pp.-191.
- [61] Ali, M., Suleman, T., Uzmi, Z. A., “Mmac: a mobility-adaptive, collision-free mac protocol for wireless sensor networks”, in PCCC 2005. 24th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference, 2005., April 2005, str. 401-407.

- [62] Watteyne, T., Augé-Blum, I., Ubéda, S., “Dual-mode real-time mac protocol for wireless sensor networks: A validation/simulation approach”, in Proceedings of the First International Conference on Integrated Internet Ad Hoc and Sensor Networks, ser. InterSense '06. New York, NY, USA: ACM, 2006, dostupno na: <http://doi.acm.org/10.1145/1142680.1142683>
- [63] He, T., Stankovic, J., Lu, C., Abdelzaher, T., “Speed: a stateless protocol for real-time communication in sensor networks”, in Distributed Computing Systems, 2003. Proceedings. 23rd International Conference on, 2003, str. 46-55.
- [64] Sohrabi, K., Gao, J., Ailawadhi, V., Pottie, G. J., “Protocols for self-organization of a wireless sensor network”, IEEE Personal Communications, Vol. 7, 2000, str. 16–27.
- [65] İlhan Akbaş, M., Turgut, D., “Lightweight routing with dynamic interests in wireless sensor and actor networks”, Ad Hoc Networks, Vol. 11, No. 8, 2013, str. 2313 - 2328, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870513001212>
- [66] Akbas, M., Turgut, D., “Lightweight routing with qos support in wireless sensor and actor networks”, in Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), 2010 IEEE, Dec 2010, str. 1-5.
- [67] Gungor, V., Vuran, M., Akan, O., “On the cross-layer interactions between congestion and contention in wireless sensor and actor networks”, Ad Hoc Networks, Vol. 5, No. 6, 2007, str. 897 - 909, (1) Wireless Mesh Networks (2) Wireless Sensor Networks, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870507000273>
- [68] Kim, Y., Hwang, G., “Design and analysis of medium access protocol: Throughput and short-term fairness perspective”, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 23, No. 3, June 2015, str. 959-972.
- [69] Verdone, R., Dardari, D., Mazzini, G., Conti, A., “2 - applications of {WSANs}”, in Wireless Sensor and Actuator Networks, Verdone, R., Dardari, D., , Mazzini, G., , Conti, A., (ur.). Oxford: Academic Press, 2008, str. 13 - 43, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123725394000026>
- [70] Curiac, D.-I., “Towards wireless sensor, actuator and robot networks: Conceptual framework, challenges and perspectives”, Journal of Network and Computer Applications, Vol. 63, 2016, str. 14 - 23, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804516000345>
- [71] Wark, T., Crossman, C., Hu, W., Guo, Y., Valencia, P., Sikka, P., Corke, P., Lee, C., Henshall, J., Prayaga, K., O’Grady, J., Reed, M., Fisher, A., “The design and evaluation of a mobile sensor/actuator network for autonomous animal control”, in 2007 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, April 2007, str. 206-215.
- [72] Pescaru, D., Curiac, D.-I., “Ensemble based traffic light control for city zones using a reduced number of sensors”, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 46, 2014, str. 261 - 273, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X14001855>
- [73] Chen, Y.-A., Yeh, L.-W., Tseng, Y.-C., “Controlling the fluid factors of an environment by sensor and actuator networks”, Pervasive and Mobile Computing, Vol. 27, 2016, str. 106 - 115, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157411921500142X>

- [74] Labeodan, T., Bakker, C. D., Rosemann, A., Zeiler, W., "On the application of wireless sensors and actuators network in existing buildings for occupancy detection and occupancy-driven lighting control", *Energy and Buildings*, Vol. 127, 2016, str. 75 - 83, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816304558>
- [75] Horvat, G., Sostaric, D., Zagar, D., "User authorization system using zigbee wsn and avr architecture", in *Telecommunications Forum (TELFOR)*, 2011 19th, Nov 2011, str. 381-384.
- [76] Horvat, G., Balkic, Z., Zagar, D., "Real-time wsn communication for access control applications", in *Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, 2013 36th International Conference on, July 2013, str. 321-325.
- [77] Horvat, G., Zagar, D., Vlaovic, J., "On the topic of rtt and delivery ratio in query driven wireless sensor networks", in *2015 IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings*, April 2015, str. 293-299.
- [78] Horvat, G., Vlaović, J., Žagar, D., "Improving qos in query-driven wsn using a cross-layered handover algorithm", in *2015 4th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, June 2015, str. 236-239.
- [79] Horvat, G., "Bežična rfid autorizacija korisnika", Master's thesis, Elektrotehnički fakultet Osijek, 12 2010, voditelj: Rimac-Drlje, Snježana.
- [80] Somappa, A. A. K., Øvsthus, K., Kristensen, L. M., "Implementation and deployment evaluation of the {DMAMAC} protocol for wireless sensor actuator networks", *Procedia Computer Science*, Vol. 83, 2016, str. 329 - 336, the 7th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2016) / The 6th International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2016) / Affiliated Workshops, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050916301636>
- [81] Sardouk, A., Rahim-Amoud, R., Merghem-Boulahia, L., Gaiti, D., "A multi-criterion data aggregation scheme for wsn", in *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, ser. WIMOB '09. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2009, str. 30–35, dostupno na: <http://dx.doi.org/10.1109/WiMob.2009.15>
- [82] Roman, R., Lopez, J., "Integrating wireless sensor networks and the internet: A security analysis", *Internet Research*, Vol. 19, No. 2, 2009, str. 246-259.
- [83] Montorsi, F., "Technical specifications on embit emb-zrf231pa wireless module", Embit Ltd, Tech. Rep., 2013.
- [84] Song, X., Wang, C., Pei, J., "2asennet: A multiple qos metrics hierarchical routing protocol based on swarm intelligence optimization for wsn", in *Information Science and Technology (ICIST)*, 2012 International Conference on, 2012, str. 531-534.
- [85] Sumathi, R., Srinivas, M. G., "A survey of qos based routing protocols for wireless sensor networks.", *JIPS*, Vol. 8, No. 4, 2012, str. 589-602.
- [86] Buratti, C., "Performance analysis of ieee 802.15.4 beacon-enabled mode", *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, Vol. 59, No. 4, May 2010, str. 2031-2045.

- [87] Khanafer, M., Guennoun, M., Mouftah, H. T., "A survey of beacon-enabled ieee 802.15.4 mac protocols in wireless sensor networks", IEEE Communications Surveys and Tutorials, Vol. 16, 2014, str. 856-876.
- [88] Yaqoob, M., Israr, I., Javaid, N., Khan, M., Qasim, U., Khan, Z., "Transmission delay of multi-hop heterogeneous networks for medical applications", in Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), 2012 Seventh International Conference on, Nov 2012, str. 428-433.
- [89] Atmel. (2014) AVR2130:lightweight mesh developer guide, dostupno na: http://www.atmel.com/images/atmel-42028-lightweight-mesh-developer-guide_application-note_avr2130.pdf
- [90] Feng, H., Ma, M., Traffic Prediction over Wireless Networks, Lagkas, T., Angelidis, P., Georgiadis, L., (ur.). IGI Global, 2010.
- [91] Ilyas, M. U., Radha, H., "End-to-end channel capacity of a wireless sensor network under reachback", in 2006 40th Annual Conference on Information Sciences and Systems, March 2006, str. 1713-1718.
- [92] Virmani, D., Jain, S., "Real time communication capacity for data delivery in wireless sensor networks", CoRR, Vol. abs/1201.4946, 2012.
- [93] Lloyd, E., Xue, G., "Relay node placement in wireless sensor networks", Computers, IEEE Transactions on, Vol. 56, No. 1, 2007, str. 134-138.
- [94] Das, D., Rehena, Z., Roy, S., Mukherjee, N., "Multiple-sink placement strategies in wireless sensor networks", in 2013 Fifth International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS), Jan 2013, str. 1-7.
- [95] Schmitt, J., Zdarsky, F. A., Roedig, U., "Sensor Network Calculus with Multiple Sinks", in Proceedings of IFIP NETWORKING 2006, Workshop on Performance Control in Wireless Sensor Networks, Coimbra, Portugal. Springer LNCS, May 2006, str. 6-13, ISBN 972-95988-5-1, dostupno na: /discofiles/publicationsfiles/SZR06-1.pdf
- [96] Friedmann, L., Boukhatem, L., "Efficient multi-sink relocation in wireless sensor network", in Networking and Services, 2007. ICNS. Third International Conference on, June 2007, str. 90-90.
- [97] Khan, M. M., Lodhi, M. A., Rehman, A., Hussain, F. B., "A multi-sink coordination framework for low power and lossy networks", in 2016 International Conference on Industrial Informatics and Computer Systems (CIICS), March 2016, str. 1-5.
- [98] Soua, R., Minet, P., "A survey on multichannel assignment protocols in wireless sensor networks", in 2011 IFIP Wireless Days (WD), Oct 2011, str. 1-3.
- [99] Incel, O. D., "A survey on multi-channel communication in wireless sensor networks", Computer Networks, Vol. 55, No. 13, 2011, str. 3081 - 3099, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128611001873>
- [100] Jovanovic, M. D., Djordjevic, G. L., Nikolic, G. S., Petrovic, B. D., "Multi-channel media access control for wireless sensor networks: A survey", in 2011 10th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite Cable and Broadcasting Services (TEL-SIKS), Vol. 2, Oct 2011, str. 741-744.

- [101] So, J., Vaidya, N. H., “Multi-channel mac for ad hoc networks: Handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver”, in Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, ser. MobiHoc '04. New York, NY, USA: ACM, 2004, str. 222–233, dostupno na: <http://doi.acm.org/10.1145/989459.989487>
- [102] Zhou, G., He, T., Krishnamurthy, S., Stankovic, J. A., “Impact of radio irregularity on wireless sensor networks”, in Proceedings of the 2Nd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, ser. MobiSys '04. New York, NY, USA: ACM, 2004, str. 125–138, dostupno na: <http://doi.acm.org/10.1145/990064.990081>
- [103] Horvat, G., Rimac-Drlje, S., Žagar, D., “Fade depth prediction using human presence for real life wsn deployment”, *Radioengineering*, Vol. 22, No. 3, 2013, str. 758-768.
- [104] Ahmad, A., Ahmad, S., Rehmani, M. H., Hassan, N. U., “A survey on radio resource allocation in cognitive radio sensor networks”, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, Vol. 17, No. 2, Secondquarter 2015, str. 888-917.
- [105] Soua, R., Minet, P., “Multichannel assignment protocols in wireless sensor networks: A comprehensive survey”, *Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 16, Part A, 2015, str. 2 - 21, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574119214000613>
- [106] Wu, Y., Stankovic, J. A., He, T., Lin, S., “Realistic and efficient multi-channel communications in wireless sensor networks”, in *IEEE INFOCOM 2008 - The 27th Conference on Computer Communications*, April 2008.
- [107] Wang, X., Wang, X., Fu, X., Xing, G., Jha, N., *Flow-Based Real-Time Communication in Multi-Channel Wireless Sensor Networks*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, str. 33–52, dostupno na: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-00224-3_3
- [108] Kim, Y., Shin, H., Cha, H., “Y-mac: An energy-efficient multi-channel mac protocol for dense wireless sensor networks”, in *2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks (ipsn 2008)*, April 2008, str. 53-63.
- [109] Zhou, G., Huang, C., Yan, T., He, T., Stankovic, J. A., Abdelzaher, T. F., “Mmsn: Multi-frequency media access control for wireless sensor networks”, in *Proceedings IEEE INFOCOM 2006. 25TH IEEE International Conference on Computer Communications*, April 2006, str. 1-13.
- [110] Li, J., Zhang, D., Guo, L., Ji, S., Li, Y., “Arm: An asynchronous receiver-initiated multi-channel mac protocol with duty cycling for wsns”, in *International Performance Computing and Communications Conference*, Dec 2010, str. 114-121.
- [111] Chen, J., Yu, Q., Chai, B., Sun, Y., Fan, Y., Shen, X. ., “Dynamic channel assignment for wireless sensor networks: A regret matching based approach”, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol. 26, No. 1, Jan 2015, str. 95-106.
- [112] Le, H. K., Henriksson, D., Abdelzaher, T., “A practical multi-channel media access control protocol for wireless sensor networks”, in *2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks (ipsn 2008)*, April 2008, str. 70-81.

- [113] Tang, L., Sun, Y., Gurewitz, O., Johnson, D. B., “Em-mac: A dynamic multichannel energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks”, in Proceedings of the Twelfth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, ser. MobiHoc '11. New York, NY, USA: ACM, 2011, str. 23:1–23:11, dostupno na: <http://doi.acm.org/10.1145/2107502.2107533>
- [114] Fotue, D., Labiod, H., Engel, T., “Performance evaluation of hybrid channel assignment for wireless sensor networks”, in 2012 8th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN), Dec 2012, str. 31-37.
- [115] Vodel, M., Lippmann, M., Hardt, W., “Dynamic channel management for advanced, energy-efficient sensor-actor-networks”, in 2011 World Congress on Information and Communication Technologies, Dec 2011, str. 413-418.
- [116] Chaichana, Y., Teeraparbajorn, W., “Performance analysis of multi-channel multi-interface aodv in ieee-802.15.4 wsans”, in 2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), June 2015, str. 1-6.
- [117] Vassilis, D., Kormentzas, G., Skianis, C., “Performance evaluation of single and multi-channel actor to actor communication for wireless sensor actor networks”, Ad Hoc Networks, Vol. 4, No. 4, 2006, str. 487 - 498, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870505000259>
- [118] Neves, P. A., Rodrigues, J. J., Chen, M., Vasilakos, A. V., “A multi-channel architecture for ipv6-enabled wireless sensor and actuator networks featuring pnp support”, Journal of Network and Computer Applications, Vol. 37, No. 0, 2014, str. 12 - 24, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804511000877>
- [119] Hidaka, T., Nobayashi, D., Fukuda, Y., Tsukamoto, K., Ikenaga, T., Transmission Channel Switching Based on Channel Utilization in ROD-SAN. Cham: Springer International Publishing, 2015, str. 129–138, dostupno na: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-19210-9_9
- [120] Hidaka, T., Nobayashi, D., Fukuda, Y., Tsukamoto, K., Ikenaga, T., “Performance evaluation of multi-hop communication with a dynamic channel switching scheme in rod-san”, in 2015 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM), Aug 2015, str. 332-337.
- [121] Kakarla, J., Majhi, B., Babu, B. R., Tripathi, M., “A multi-channel mac protocol for actor-actor coordination in wsan”, in TENCON 2014 - 2014 IEEE Region 10 Conference, Oct 2014, str. 1-6.
- [122] Kakarla, J., Majhi, B., Battula, R. B., “Iammac: An interference-aware multichannel mac protocol for wireless sensor-actor networks”, Int. J. Commun. Syst., Vol. 29, No. 4, Mar. 2016, str. 801–822, dostupno na: <http://dx.doi.org/10.1002/dac.3034>
- [123] Islam, M. S., Alam, M. M., Hong, C. S., Lee, S., “Load-adaptive practical multi-channel communications in wireless sensor networks”, Sensors, Vol. 10, No. 9, 2010, str. 8761–8781, dostupno na: <http://www.mdpi.com/1424-8220/10/9/8761>

- [124] Zhuang, Y., Chen, L., Wang, X. S., Lian, J., “A weighted moving average-based approach for cleaning sensor data”, in 27th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS '07), June 2007, str. 38-38.
- [125] Yan-ming, C., Yong-jun, X., Qiu-guang, W., Lei, X., “An adaptive fault-tolerant scheme for wireless sensor networks”, in Communications and Mobile Computing, 2009. CMC '09. WRI International Conference on, Vol. 2, Jan 2009, str. 32-36.
- [126] Shu, J., Liu, L., Zhang, R., “An energy-effective link quality monitoring mechanism for event-driven wireless sensor network”, in Communications and Mobile Computing, 2009. CMC '09. WRI International Conference on, Vol. 2, Jan 2009, str. 111-115.
- [127] Jiang, Z., Jin, X., Zhang, Y., “A weather-condition prediction algorithm for solar-powered wireless sensor nodes”, in 2010 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM), Sept 2010, str. 1-4.
- [128] Mi, X., Zhao, H., Zhu, J., “Research on ewma based link quality evaluation algorithm for wsn”, in Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), 2011, Vol. 1, July 2011, str. 757-759.
- [129] Cammarano, A., Petrioli, C., Spenza, D., “Pro-energy: A novel energy prediction model for solar and wind energy-harvesting wireless sensor networks”, in 2012 IEEE 9th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS 2012), Oct 2012, str. 75-83.
- [130] Li, H., Cheng, Y., Zhou, C., Zhuang, W., “Routing metrics for minimizing end-to-end delay in multiradio multichannel wireless networks”, IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst., Vol. 24, No. 11, Nov. 2013, str. 2293–2303, dostupno na: <http://dx.doi.org/10.1109/TPDS.2012.327>
- [131] Abhilash, L. N., Goenka, D., Kumar, C., “Dynamic data aggregation for energy optimization in multi-hop wireless sensor networks”, in Advance Computing Conference (IACC), 2014 IEEE International, Feb 2014, str. 143-148.
- [132] Pinto, P., Pinto, A., Ricardo, M., “Cross-layer admission control to enhance the support of real-time applications in wsn”, IEEE Sensors Journal, Vol. 15, No. 12, Dec 2015, str. 6945-6953.
- [133] Shi, L., Fapojuwo, A., Viberg, N., Hoople, W., Chan, N., “Methods for calculating bandwidth, delay, and packet loss metrics in multi-hop ieee802.11 ad hoc networks”, in VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference, May 2008, str. 103-107.
- [134] Ahsan, S. B., Vaidya, N., “O-ack: An adaptive wireless mac protocol exploiting opportunistic token-passing and ack piggybacking”, in 2015 IEEE 40th Conference on Local Computer Networks (LCN), Oct 2015, str. 410-413.
- [135] Cerpa, A., Wong, J. L., Kuang, L., Potkonjak, M., Estrin, D., “Statistical model of lossy links in wireless sensor networks”, in Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, ser. IPSN '05. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2005, dostupno na: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1147685.1147701>
- [136] Zhou, G., He, T., Krishnamurthy, S., Stankovic, J. A., “Models and solutions for radio irregularity in wireless sensor networks”, ACM Trans. Sen. Netw., Vol. 2, No. 2, May 2006, str. 221–262, dostupno na: <http://doi.acm.org/10.1145/1149283.1149287>

- [137] Sasikumar, P., Jagadeesan, N., “Heuristic approaches with probabilistic management for node placement in wireless sensor networks”, in *Advances in Computing, Control, Telecommunication Technologies*, 2009. ACT '09. International Conference on, 2009, str. 734-736.
- [138] M.Brazil, C.J.Ras, D.A.Thomas, “Deterministic deployment of wireless sensor networks”, in *Proceedings of the World Congress on Engineering 2009 Vol I, WCE '09*, July 1 - 3, 2009, London, U.K., ser. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, Ao, S. I., Gelman, L., Hukins, D. W., Hunter, A., Korsunsky, A. M., (ur.), International Association of Engineers. Newswood Limited, 2009, str. 863–868.
- [139] Li, J., Andrew, L. L., Foh, C. H., Zukerman, M., Chen, H.-H., “Connectivity, coverage and placement in wireless sensor networks”, *Sensors*, Vol. 9, No. 10, 2009, str. 7664–7693, dostupno na: <http://www.mdpi.com/1424-8220/9/10/7664>
- [140] Leoncini, M., Resta, G., Santi, P., “Partially controlled deployment strategies for wireless sensors”, *Ad Hoc Networks*, Vol. 7, No. 1, 2009, str. 1 - 23, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870507001771>
- [141] Chiasserini, C.-F., Gaeta, R., Garetto, M., Gribaudo, M., Manini, D., Sereno, M., “Fluid models for large-scale wireless sensor networks”, *Performance Evaluation*, Vol. 64, No. 7–8, 2007, str. 715 - 736, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166531606001234>
- [142] Sheldon, M., Chen, D., Nixon, M., Mok, A. K., “A practical approach to deploy large scale wireless sensor networks”, in *IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference*, 2005., Nov 2005, str. 8 pp.-250.
- [143] Putthividhya, W., “Quality of service (qos) support for multimedia applications in large-scale networks”, *Doktorski rad*, Ames, IA, USA, 2006, aAI3243828.
- [144] Wang, Q., Hempstead, M., Yang, W., “A realistic power consumption model for wireless sensor network devices”, in *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, 2006. SECON '06. 2006 3rd Annual IEEE Communications Society on, Vol. 1, Sept 2006, str. 286-295.
- [145] Mazda, F., *Telecommunications Engineer's Reference Book*. Focal Press, 1998, dostupno na: <https://books.google.hr/books?id=-M9nQgAACAAJ>
- [146] Chang, K., *RF and Microwave Wireless Systems*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [147] Ghosh, A., Das, S. K., “Coverage and connectivity issues in wireless sensor networks: A survey”, *Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 4, No. 3, 2008, str. 303 - 334, dostupno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574119208000187>
- [148] Hekmat, R., Van Mieghem, P., “Connectivity in wireless ad-hoc networks with a log-normal radio model”, *Mob. Netw. Appl.*, Vol. 11, No. 3, Jun. 2006, str. 351–360, dostupno na: <http://dx.doi.org/10.1007/s11036-006-5188-7>
- [149] Hazewinkel, M., *Encyclopaedia of Mathematics*), ser. *Encyclopaedia of Mathematics: An Updated and Annotated Translation of the Soviet "Mathematical Encyclopaedia"*. Springer, 1987, dostupno na: <https://books.google.hr/books?id=WzbzxytdAuUC>

- [150] Maleki, M., Pedram, M., “Qom and lifetime-constrained random deployment of sensor networks for minimum energy consumption”, in *Information Processing in Sensor Networks*, 2005. IPSN 2005. Fourth International Symposium on, April 2005, str. 293-300.
- [151] Abdul Majeed, A., “Prolonging network life time and running multi-sequence applications in wireless sensor networks”, thesis. 2014.
- [152] Huang, J., Liu, S., Xing, G., Zhang, H., Wang, J., Huang, L., “Accuracy-aware interference modeling and measurement in wireless sensor networks”, in *Proceedings of the 2011 31st International Conference on Distributed Computing Systems*, ser. ICDCS '11. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2011, str. 172–181, dostupno na: <http://dx.doi.org/10.1109/ICDCS.2011.47>
- [153] Liu, S., Xing, G., Zhang, H., Wang, J., Huang, J., Sha, M., Huang, L., “Passive interference measurement in wireless sensor networks”, in *Proceedings of the The 18th IEEE International Conference on Network Protocols*, ser. ICNP '10. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2010, str. 52–61, dostupno na: <http://dx.doi.org/10.1109/ICNP.2010.5762754>
- [154] Tsai, H.-M., Tonguz, O. K., Saraydar, C., Talty, T., Ames, M., Macdonald, A., “Zigbee-based intra-car wireless sensor networks: a case study”, *IEEE Wireless Communications*, Vol. 14, No. 6, December 2007, str. 67-77.
- [155] Carvalho, C., Gomes, D. G., Agoulmine, N., de Souza, J. N., “Improving prediction accuracy for wsn data reduction by applying multivariate spatio-temporal correlation”, *Sensors*, Vol. 11, No. 11, 2011, str. 10010, dostupno na: <http://www.mdpi.com/1424-8220/11/11/10010>
- [156] Moreno, R., Robles-Gómez, A., Bermúdez, A., Casado, R., “Sensgrid: Modeling and simulation for wireless sensor grids”, *Simulation*, Vol. 88, No. 8, Aug. 2012, str. 972–987, dostupno na: <http://dx.doi.org/10.1177/0037549711434180>

POPIS KRATICA

6LowPan	IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks
ACK	ACKnowledgement
ACS	Average-channel-utilization based Channel Switching
AODV	Ad hoc On-Demand Distance Vector
APP	Application layer
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BI	Beacon Interval
BSAM	Bežična Senzorska i Aktorska Mreža
BSČ	Bežični Senzorski Čvor
BSM	Bežična Senzorska Mreža
CCA	Clear Channel Assessment
CDF	Cumulative Distribution Function
CLCM	Cross-Layer Multi Channel
CQPS	Cumulative Queries Per Second
CSMA/CA	Carrier sense multiple access with collision avoidance
DAQ	Data Acquisition
EWMA	Exponentially Weighted Moving Average
F/S	Fail/Successful
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFD	Full Functionality Device
FSL	Free Space Losses
GPS	Global Positioning System
H-CLMC	Hybrid Cross-Layer Multi Channel
HF	High Frequency
IoT	Internet of Things
IPv4	Internet Protocol version 4
IPv6	Internet Protocol version 6
LAN	Local Area Network

LNA	Low Noise Amplifier
LQI	Link Quality Indicator
LWM	LightWeight Mesh
MA	Moving Average
MAC	Medium Access Control
MANET	Mobile Ad Hoc NETwork
NI	National Instruments
NWK	NetWorK
PA	Power Amplifier
PDF	Probability Distribution Function
PER	Packet Error Rate
PHY	PHYsical
PIFA	Planar Inverted F Antenna
PL	Path Loss
QOS	Quality of Service
RF	Radio Frequency
RFD	Reduced Functionality Device
RFID	Radio Frequency IDentification
RMSE	Root Mean Square Error
ROD-SAN	Radio On Demand - Sensor and Actuator Network
RTT	Round Trip Time
RREP	Routing Reply
RREQ	Route Request
SD	Superframe Duration
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SPOF	Single Point Of Failure
TDMA	Time Division Multiple Access
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
WAN	Wide Area Network

WMSN	Wireless Multimedia Sensor Network
WSAN	Wireless Sensor and Actor Network
WSN	Wireless Sensor Network

SAŽETAK

Bežične senzorske mreže, BSM (engl. *Wireless Sensor Networks*; WSN) predstavljaju strukturu sadržanu od senzorskih čvorova raspoređenih u promatranom prostoru. Ova disertacija stavlja u prvi plan posebnu vrstu bežičnih senzorskih mreža koja uz osjetni (senzorski) element uključuje i aktorski (djelatni) element. Ove vrste BSM-a nazivaju se još i bežične senzorske i aktorske mreže, BSAM (engl. *Wireless Sensor and Actor Networks*, WSAN). Razvojem BSAM pojavljuju se nove primjene i aplikacije gdje postojeći modeli koordinacije nisu odgovarajući. Primjer primjene je okruženje gdje aktorski čvor u mreži šalje upit određenog sadržaja prema centru obrade izvan same BSAM i očekuje odgovor na postavljeni upit. Zbog mogućih industrijskih primjena ovog modela zahtjevi koji se postavljaju na mrežu uključuju visoku pouzdanost, malo kašnjenje i veliku zalihost mreže, što nije moguće ostvariti koristeći postojeće modele koordinacije u BSAM. Ovi zahtjevi se mogu svesti pod pojmom podrške kvaliteti usluge (engl. *Quality of Service*, QoS) u BSAM. U okviru ove disertacije predložen je novi hibridni model koordinacije u BSAM koji omogućuje visoku pouzdanost komunikacije i zalihost mreže te toleranciju na kvarove. Kako bi se smanjio problem dijeljenog medija i stvaranja zagušenja na strani krajnjeg odredišta u mreži, u ovoj disertaciji predložen je protokol komunikacije međuslojnim pristupom, tj. poprečnim dizajnom slojeva (engl. *cross-layer approach*), koji koristi višekanalnu arhitekturu i višedredišnu topologiju, s ciljem poboljšanja kvalitete usluge u BSAM: **H-CLMC**. Implementacijom predloženog protokola smanjuje se utjecaj dijeljenog medija korištenjem višekanalne arhitekture. Konačni rezultat je smanjenju vremena odziva te povećanjem vjerojatnosti uspješnog upita u BSAM, što rezultira poboljšanjem kvalitete usluge. Predloženi H-CLMC protokol vrednovan je metodom simulacije i eksperimentom u laboratorijskim uvjetima, te je prikazana prednost predloženog protokola u usporedbi s postojećim rješenjima iz literature (ACS i CONTROL). Naposljetku, za predloženi protokol komunikacije predložena je metoda procjene kvalitete usluge u velikim BSAM, postupkom skaliranja mreže iz laboratorijskih uvjeta. Predložena je metoda procjene kvalitete usluge temeljena na empirijskom modelu kumulativnog broja upita u mreži, u jedinici vremena (CQPS) i vjerojatnosti uspješnog upita. Predložen je model vjerojatnosti uspješnog upita za različite brojeve krajnjih odredišta u mreži, te model vremena odziva. Naposljetku, opisane su prednosti i nedostaci predložene metode te su predložene smjernice za buduće istraživanje.

Ključne riječi: BSM, BSAM, kvaliteta usluge, višedredišna topologija, višekanalna arhitektura, eksperimentalno vrednovanje, velike mreže, hibridni model koordinacije.

ABSTRACT

Quality of Service Enhancement Using Multisink Topology and Multichannel Architecture in Wireless Sensor and Actor Networks

Wireless Sensor Networks (WSNs) are networks formed by sensor nodes deployed within the area of interest. With the development of microelectronics and embedded systems, WSNs are becoming more advanced and their sensor nodes are becoming smaller and more efficient. There is a special type of WSNs that integrates sensing and acting components. These networks are called Wireless Sensor Networks and Actor Networks (WSANs). They have the ability to respond to a specific action obtained by a sensor. An application example is a communication model focused on a request initiated by an actor node where the actor node sends a query to the data processing center outside WSAN and awaits the response. Due to a possible industrial application of this model, the demands that are placed on the network are high reliability and redundancy of the network, which cannot be achieved by using the existing coordination models. This problem can be defined as Quality of Service (QoS) provisioning in WSANs. This thesis proposes a new hybrid coordination model for WSANs. The model allows high data reliability, network redundancy and fault tolerance. To avoid shared media issues and congestion at the network sink, the thesis proposes a cross layer algorithm and communication protocol named Hybrid - Cross Layer Multi Channel protocol (H-CLMC). The protocol uses a multisink topology and multichannel architecture with the goal of Quality of Service (QoS) enhancement in WSANs. By using multichannel architecture and multisink topology, the proposed algorithm reduces the impact of shared media using redundant multi-channel architecture. H-CLMC reduces round-trip-time and increases the probability of a successful query in WSANs. The protocol is evaluated by simulation and experimental validation, and the advantages of the protocol are shown in comparison to the existing solutions from the literature (CONTROL and ACS). Finally, a method for estimating QoS in large WSANs and the suggested H-CLMC is proposed by scaling networks from laboratory conditions to large networks. The proposed method is based on an empirical model of Cumulative Queries per Second (CQPS) metric and the probability of a successful query. An empirical model for the probability of successful queries estimation and round trip time estimation is proposed. Finally, the advantages and disadvantages of the proposed method are presented and the guidelines for future work are given.

Keywords: WSN, WSAN, QoS, multi-channel, multi-sink, experimental validation, large-scale, hybrid coordination model.

ŽIVOTOPIS

Goran Horvat rođen je 23. veljače 1987. god. u Požegi. Godine 2001. uključuje se u rad ACSL (engl. *American Computer Science League*) tijekom pohađanja Tehničke škole Požega, gdje osvaja prvo mjesto na međunarodnom natjecanju četiri godine za redom. Sudjeluje na ACSL završnom natjecanju u Chicagu, Sjedinjene Američke Države 2004. godine. Godine 2005. upisuje se na Preddiplomski studij Elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku (smjer Komunikacije i informatika) gdje osvaja državnu stipendiju za nadarene. Studij završava 2008. godine te upisuje Diplomski studij Elektrotehnike (smjer Komunikacije i informatika) na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku. Diplomski studij završava 2010. godine s diplomskim radom: „Bežična RFID autorizacija korisnika“, stječući zvanje magistar inženjer elektrotehnike – summa cum laude. Početkom 2011. godine zapošljava se u tvrtci ECCOS inženjering (Zagreb), na mjestu voditelja projekta za sustave tehničke zaštite. U srpnju godine 2011. zapošljava se na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku na kao znanstveni novak – asistent na projektu MZOŠ RH 165-0362027-1479, „Širokopojasni pristup i internetske usluge u ruralnim područjima“.

Na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku održava nastavu na preddiplomskom i diplomskom studiju elektrotehnike i računarstva. Od 2012. godine pomoćnik je urednika u međunarodnom časopisu *International Journal of Advanced Computing Research* (www.ijacr.com). Godine 2013. izabran je za člana Etičkog povjerenstva Elektrotehničkog fakulteta u Osijeku u trajanju od 4 godine. Godine 2014. prima priznanje za iznimne rezultate ostvarene polaganjem ispita i objavljivanjem znanstvenih radova na poslijediplomskom doktorskom studiju Elektrotehničkog fakulteta u Osijeku. Glavno područje njegovog znanstvenog istraživanja je kvaliteta usluge u bežičnim senzorskim i aktorskim mrežama. U svom znanstvenom istraživanju i stručnom radu publicirao je više od 35 znanstvenih članaka kao autor/koautor (uključujući članke u časopisima te sudjelovanja na međunarodnim znanstvenim skupovima). Koautor je poglavlja u knjizi na engleskom jeziku te sveučilišnog udžbenika na hrvatskom jeziku. Tijekom svog znanstvenog rada sudjeluje na pet projekata te na COST akciji IC1301. Sudjelovanjem u ERASMUS+ programu razmjene osoblja usavršava se u području simulacija bežičnih mreža na institutu INESC (Porto, Portugal) u trajanju od mjesec dana. Član je Hrvatskog Radioamaterskog Saveza, IEEE, KES i MANT strukovnih udruga.

Goran Horvat, mag.ing.el.

PRILOG I

```
1  /**-- *****
2  * file:      Hclmc.cc
3  *
4  * author:    Goran Horvat
5  *
6  ***** */
7  #include "Hclmc.h"
8
9  #include "FindModule.h"
10 #include "BaseLayer.h"
11 #include "BaseNetwLayer.h"
12 #include "AddressingInterface.h"
13 #include "NetwControlInfo.h"
14 #include "FindModule.h"
15 #include "SimpleAddress.h"
16 #include "BaseWorldUtility.h"
17 #include "ApplPkt_m.h"
18 #include "simtime.h"
19 #include "FFroute.h"
20 #include <cmath>
21
22 using std::map;
23 using std::string;
24
25 Define_Module(Hclmc);
26
27 void Hclmc::initialize(int stage)
28 {
29     cSimpleModule::initialize(stage);
30     if (stage == 0) {
31         a_ewma = par("alphaEWMA");
32         cqps=NULL;
33         p_rtt=1;
34         p_cqps=1;
35         p_csma =1;
36         lastChSwitch=simTime();
37         rttEwma=0;
38         beta[0] = 0;
39         beta[1] = 0;
40         beta[2] = 0;
41         beta[3] = 0;
42
43         cModule *targetModule = getParentModule()->getSubmodule("nic")->getSubmodule("mac");
44         macModule = check_and_cast<csma*>(targetModule);
45
46         if (!macModule) {
```

```

47         error("No MAC module found, please check your ned configuration.");
48     }
49
50 // } else if(stage == 1) { // it seems that we are initialized only once. Why ?
51 // }
52 }
53
54 //pokrece se kad se primi informacija o odaslanom upitu te kad se primi CQPS pokazatelj
55 void Hclmc::handleInfoRecieived(cMessage * msg) {
56     int msgType=msg->getKind();
57
58     cObject * ci = msg->removeControlInfo();
59     if (ci) {
60         CqpsInfo * info = check_and_cast<CqpsInfo*>(ci);
61         cqps = info->cqps;
62         algorithm = info->algorithm;
63         EV<< "CQPS0 : " << cqps[0] << " CQPS1 : " << cqps[1] << " CQPS2 : " << cqps[2] << " CQPS3←
            : " << cqps[3] << endl;
64     }
65
66     lastMsgTpe = msgType;
67
68     if(algorithm == "CLMC")
69     {
70         if (msgType != NWK_SUCCESS_STATUS)
71             beta[0] = beta[0]*0.5 + 0.5;
72         else
73             beta[0] = beta[0]*0.5;
74
75         if ((msgType != NWK_SUCCESS_STATUS )&& (beta[0] > uniform(0, 1)))
76         {
77             beta[0]=0;
78             macModule->shuffleChannels();
79         }
80     }
81
82     if(algorithm == "HCLMC")
83     {
84         double alpha=1;
85         if(msgType == NWK_PHY_CHANNEL_ACCESS_FAILURE_STATUS || msgType == NWK_PHY_NO_ACK_STATUS←
            || msgType == NWK_NO_ACK_STATUS)
86             alpha=0.0;
87
88         setBetaEWMA ((1-alpha));
89     }
90     delete msg;
91 }
92
93 void Hclmc::resetHisto() {

```

```

94     hist.bars[0] = 0;
95     hist.bars[1] = 1;
96     hist.boundary = initBound;
97     hist.nbRqReceived = 0;
98     hist.nbRqSent=0;
99 }
100
101 //poziva se kad se primi odgovor na upit, te se izracuna vrijednost vremena odziva tRtt
102 void Hclmc::putRttInHist(const simtime_t& tRtt) {
103     rttEwma = rttEwma*0.5 + tRtt.dbl()*0.5;
104 }
105
106 double Hclmc::getBetaEWMA() {
107     int ch = macModule->getCurrentChannel();
108     return beta[ch] ;
109 }
110
111 void Hclmc::setBetaEWMA(double alpha) {
112
113     int ch = macModule->getCurrentChannel();
114
115     beta[ch] = (1-a_ewma)*beta[ch] + a_ewma*alpha;
116
117     if (beta[ch] > 1)
118         beta[ch] = 1;
119     else if (beta[ch] < 0)
120         beta[ch] = 0;
121 }
122
123 double Hclmc::getAvgBeta() {
124     double me_cqps;
125     int nbCh = macModule->getChannelNumber();
126     double sum = 0;
127
128     for (int i = 0; i < (nbCh-1); i++)
129     {
130         sum += beta[i];
131     }
132
133     me_cqps = sum / nbCh;
134     return me_cqps;
135 }
136
137 double Hclmc::getProbFromCQPS(double currCQPS) {
138     double gamma;
139     if (currCQPS > 0) {
140         gamma = 30 / (currCQPS);
141     } else
142         gamma = 1;

```

```

143
144     if (gamma < 0)
145         gamma = 0;
146     else if (gamma > 1)
147         gamma = 1;
148
149     return gamma;
150 }
151
152 double Hclmc::getAvgCQPS() {
153     double me_cqps;
154     int nbCh = macModule->getChannelNumber();
155     double sum = 0;
156     int cntr=0;
157     if(cqps!= NULL)
158     {
159         for (int i = 0; i < (nbCh-1); i++)
160         {
161             if(cqps[i] != NULL)
162             {
163                 sum += cqps[i];
164                 cntr++;
165             }
166         }
167         me_cqps = sum / cntr;
168         return me_cqps;
169     }else
170     {
171         return 0;
172     }
173 }
174
175 double Hclmc::getpTime() {
176     double p_time, t_0;
177
178     t_0= rttEwma*2;
179
180     p_time = t_0 / ((simTime() - lastChSwitch).dbl());
181     if (p_time > 1)
182         p_time = 1;
183
184     return (1-p_time);
185 }
186
187 void Hclmc::chechChannelProb() {
188     int ch = macModule->getCurrentChannel();
189     double time = getpTime();
190     double betaAvg = getAvgBeta();
191     double b_curr = beta[ch]*time;

```

```

192
193     if (b_curr > betaAvg && b_curr> uniform(0, 1))
194     {
195         lastChSwitch=simTime();
196         macModule->shuffleChannels();
197
198         beta[macModule->getCurrentChannel()] =0;
199         resetHisto();
200         p_rtt=1;
201         p_cqps=1;
202         p_csma =1;
203     }
204 }
205
206 void Hclmc::sendDataTrigger() {
207
208     if(algorithm == "HCLMC")
209     {
210         int ch = macModule->getCurrentChannel();
211         double currCQPS;
212
213         if(cqps != NULL)
214         {
215             double me_cqps = getAvgCQPS();
216             currCQPS = cqps[ch];
217
218             double gamma = 1- getProbFromCQPS(currCQPS);
219             double gamma_avg = 1- getProbFromCQPS(me_cqps);
220
221             if(gamma>0)
222                 p_cqps = (gamma - gamma_avg)/gamma;
223             else
224                 p_cqps = 0;
225
226             if(p_cqps > getBetaEWMA()){
227                 setBetaEWMA (p_cqps);
228             }
229
230             if (lastMsgTpe != NWK_SUCCESS_STATUS)
231                 chechChannelProb();
232         }
233     }
234 }

```