



**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**



Bojan Domazetović

Analiza performansi IEEE 802.11ah sistema

- magistarski rad -

Podgorica, 2021.



**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**



Bojan Domazetović

Analiza performansi IEEE 802.11ah sistema

- magistarski rad -

Podgorica, 2021

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: **Bojan Domazetović**

Datum i mjesto rođenja: 26.11.1986. Podgorica, Crna Gora

Prethodno završene studije:

Osnovne studije: Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore,
smjer: Elektronika, telekomunikacije i računari, 180 ECTS kredita, 2009.godine
Specijalističke studije: Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore,
smjer: Telekomunikacije, 60 ECTS kredita, 2009. godine

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Elektrotehnički fakultet

Studijski program: Elektronika, telekomunikacije i računari - Telekomunikacije

Naslov rada: **Analiza performansi IEEE 802.11ah sistema**

Mentor: Prof. dr Enis Kočan

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave magistarskog rada: 09.07.2018. god.

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 26.10.2018. god.

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranta:

1. Prof. dr Zoran Veljović
2. Doc. dr Enis Kočan
3. Prof. dr Milutin Radonjić

Komisija za ocjenu rada:

1. Prof. dr Zoran Veljović
2. Doc. dr Enis Kočan
3. Prof. dr Milutin Radonjić

Komisija za odbranu rada:

1. Prof. dr Zoran Veljović
2. Prof. dr Enis Kočan
3. Prof. dr Milutin Radonjić

Datum odbrane: 5. novembar 2021. god.

Datum promocije:

Sadržaj

Sažetak	1
Abstract	3
1 Uvod	5
2 IEEE 802.11ah sistemi: koncept, namjena i pregled karakteristika na fizičkom nivou.....	14
2.1. Scenariji primjene	15
2.2. Karakteristike na fizičkom nivou	17
2.3. IEEE 802.11ah i drugi IEEE 802.11 standardi.....	21
3 Analiza ostvarivih komunikacionih dometa u IEEE 802.11ah sistemima	25
3.1. Ostvarivi dometi pri direktnoj komunikaciji.....	26
3.2. Ostvarivi dometi u relejnim sistemima	33
3.3. Brzine prenosa podataka pri maksimalno ostvarivim dometima	38
4 Analiza BER performansi IEEE 802.11ah sistema.....	45
4.1 BER performanse pri direktnoj komunikaciji	46
4.1.1 Parametri simulacije.....	46
4.1.2 Rezultati.....	47
4.2 BER performanse relejnih sistema	50
4.2.1 Parametri simulacije.....	50
4.2.2 Rezultati.....	51
5 Analiza PER performansi IEEE 802.11ah sistema	54
5.1 PER performanse u različitim scenarijima primjene	57
5.1.1 Scenario primjene: senzori i pametna brojila	59
5.1.2 Scenario primjene: <i>backhaul</i> agregacioni link	61
5.1.3 Scenario primjene: WLAN povećanog dometa i <i>Off-loading</i> saobraćaja... ..	62
5.2 PER performanse <i>uplink</i> komunikacije relejnog sistema	64
6 Zaključak	66
Literatura	68
Lista skraćenica.....	71

Sažetak

U fokusu savremenih telekomunikacija je obezbjeđivanje konekcije sve prisutnijim “pametnim” uređajima i omogućavanje komunikacije između velikog broja različitih uređaja bez posredovanja ljudi, slijedeći IoT (*Internet of Things*) i M2M (*Machine-to-Machine*) koncepte. Najveći broj IoT i M2M baziranih aplikacija zahtijeva energetski efikasan bežični prenos manje količine podataka na većim rastojanjima. Kako bi ponudili konkurentno rješenja za IoT i M2M aplikacije, IEEE 802.11 grupa je definisala i, u maju 2017.godine, usvojila “ah” amandman, prvi WLAN (*Wireless Local Area Network*) standard koji specificira komunikaciju u nelicenciranim frekvencijskim opsezima ispod 1 GHz. Pored benefita propagacije signala na nižim frekvencijama, IEEE 802.11ah optimizuje protokole i karakteristike na fizičkom nivou i nivou linka, sa ciljem povećanja pouzdanosti, efikasnosti i ostvarivih dometa u odnosu na prethodna WLAN rješenja. S obzirom na modifikacije na fizičkom nivou, od interesa je istražiti njihov uticaj na performanse IEEE 802.11ah sistema, u prvom redu na ostvarive domete, brzine prenosa i kvalitet prenosa (vjerovatnoće greške po bitu/paketu), što je i predmet istraživanja u ovom radu.

Na osnovu rezultata dobijenih analitičkim evaluacijama i simulacijama u Matlabu, analizirane su performanse IEEE 802.11ah sistema. Polazeći od osnovnog komunikacionog modela, i primjenom definisanih parametara koji su uslovljeni regulatorskim pravilima i zavise od regije u kojoj se primjenjuju, dobijeni su rezultati na osnovu kojih su prepoznate mogućnosti i ograničenja IEEE 802.11ah standarda u ispunjavanju inicijalnih ciljeva, koji se primarno odnose na obezbjeđivanje dometa do 1 km. Ograničeni nivoi predajne snage za sisteme koje je moguće razvijati u nekim geografskim područjima (npr. Evropi) i nivoi *uplink* emisionih snaga predstavljaju glavne prepreke za ostvarivanje željenih dometa, omogućavajući domete do 490 m (*downlink*) i 260 m (*uplink*), uzimajući u obzir najpovoljnije uslove propagacije i efekte *multipath* fadinga.

U cilju prevazilaženja identifikovanih ograničenja, kooperativna komunikacija je predložena kao tehnika koja može poboljšati razmatrane performanse. Analize performansi

IEEE 802.11ah relejnih sistema sa dvije dionice (*Dual Hop*), podrazumijevajući “dekodiraj-i-prosljedi” funkciju releja, su pokazale opravdanim i efikasnim primjenu relejne komunikacije u IEEE 802.11ah sistemima, unapređujući performanse sistema koje se odnose na ostvarive domete, kao i kvalitet komunikacije u slučaju maksimalno ostvarenih dometa, približavajući performanse inicijalno zahtijevanim.

Ključne riječi: IEEE 802.11ah, IoT, M2M, performanse, komunikacioni domet, relejni sistemi

Abstract

The focus of modern telecommunications is to provide connection to increasingly present "smart" devices and to enable communication between a large number of different devices without human intervention, following IoT (*Internet of Things*) and M2M (*machine-to-machine*) concepts. Most IoT and M2M based applications require energy efficient transmission of low data rate over longer distances. In order to offer competitive solutions for IoT and M2M applications, the IEEE 802.11 group has defined and adopted the "ah" amendment, the first WLAN (*Wireless Local Area Network*) standard that specifies communication in licence-free frequency bands below 1 GHz. In addition to the benefits of signal propagation at lower frequencies, IEEE 802.11ah introduces other modifications at the physical and link layer, with the aim of increasing reliability, efficiency and achievable ranges compared to previous WLAN solutions. Given the changes at the physical layer, it is of an interest to investigate their impact on the performance of the IEEE 802.11ah system, primarily on achievable ranges, bit rates, and transmission quality (bit / packet error rates).

This paper aims to analyze the performance of the IEEE 802.11ah system based on the results obtained analytically and by simulations in Matlab. Starting from the analysis of the basic communication model, and by applying defined parameters that are conditioned by regulatory rules and depend on the region in which they are applied, the obtained results show the potential and limitations of IEEE 802.11ah standards in meeting the initial objectives, which primarily refer to providing a range up to 1 km. Limited transmission power for systems that can be developed in some areas (e.g. Europe) and uplink transmission power levels, are the main limitations for achieving the intended ranges, allowing ranges up to 490 m (downlink) and 260 m (uplink) taking into account the most favorable propagation conditions and effects of multipath fading.

In order to overcome the identified limitations, cooperative communication has been proposed as a technique that can improve the considered parameters. Performance analyzes of dual hop IEEE 802.11ah relay systems, assuming "decode-and-forward" relay function, have

approved implementation of relay communications in IEEE 802.11ah systems as efficient solution for improving system performance in terms of achievable ranges and communication quality at maximum distances, approaching performance to the ones initially required.

Keywords: IEEE 802.11ah, IoT, M2M, performances, long range communications, relaying

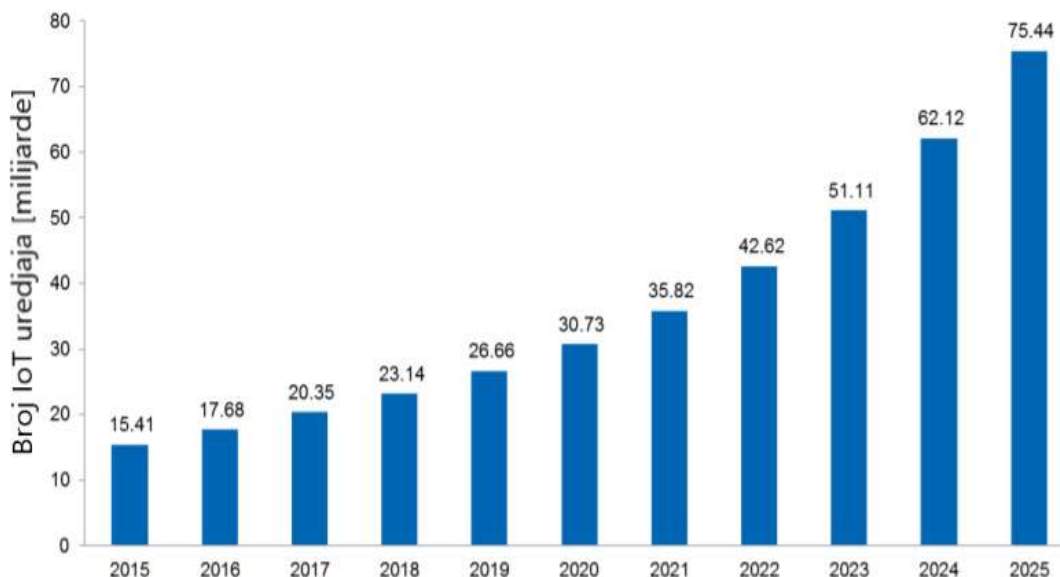
Glava 1

Uvod

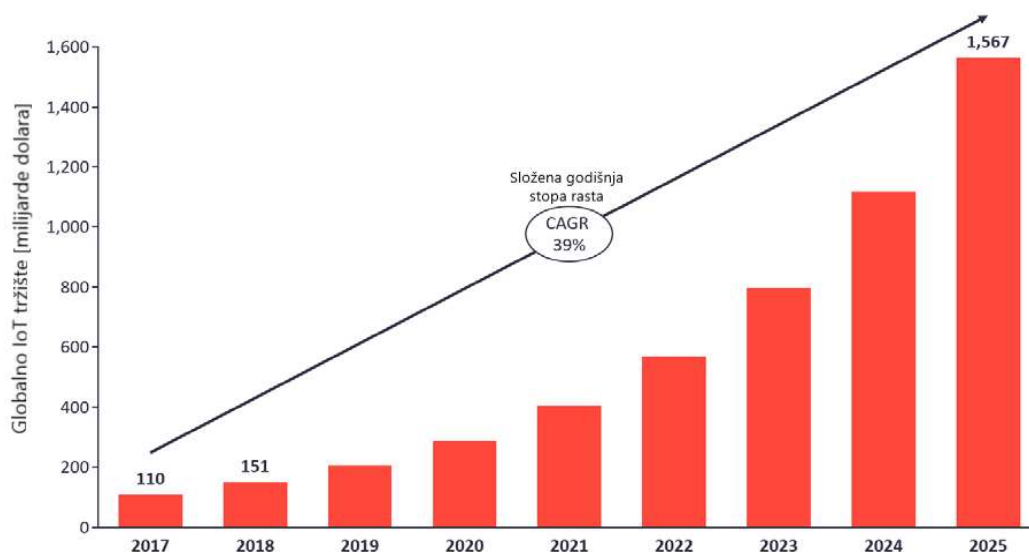
Telekomunikacioni i tehnološki razvoj je u najmanju ruku pratio, a vrlo često usmjeravao i diktirao dinamiku razvoja ekonomskih, privrednih, socijalnih, zdravstvenih i drugih životnih aspekata u posljednjih nekoliko decenija. Sve veća involviranost i sve bitnija uloga telekomunikacija u životu i radu ljudi uticali su na nagli porast interesovanja, popularnosti i konkurentnosti, ali i na usložnjavanje zahtjeva i izazova, što je rezultiralo ubrzanim razvojem telekomunikacionih tehnologija i konstantnom potrebom za unapređenjem i optimizacijom telekomunikacionih sistema. Prvobitni razvojni ciljevi bili su obezbjeđivanje telekomunikacione povezanosti među ljudima (*human-to-human* komunikacije) i omogućavanju komunikacije na svim mjestima, u bilo koje vrijeme i sa bilo kim. Ekspanzijom Interneta, “pametnih” uređaja i socijalnih mreža razvoj telekomunikacija se usmjerava ka sistemima koji tretiraju komunikaciju između ljudi i uređaja/mašina (*human-to-machine* komunikacija). Današnje vrijeme svjedoči novim konceptualnim promjenama i izazovima u telekomunikacijama, koje u prvi plan stavljaju direktnu komunikaciju između raznih tipova uređaja (senzori, brojila, pametni telefoni i uređaji, kamere idr.) bez posredovanja ljudi, tzv. *machine-to-machine* (M2M) komunikaciju, kao i obezbjeđivanje Internet konekcije za sve prisutnije različite “pametne” uređaje.

M2M komunikacija podrazumijeva razmjenu informacija između uređaja ili mašina bez učešća ljudi i predstavlja osnov za razvoj ogromnog broja aplikacija u različitim oblastima (nadzor i kontrola okruženja, poljoprivreda, zdravstvo, automatizacija u industriji i domaćinstvima i dr.). Bežične senzorske i aktuatorске mreže su najreprezentativniji primjeri M2M sistema, jer podrazumijevaju povezivanje i razmjenu informacija između velikog broja udaljenih senzora ili aktuatora. Podstaknuti razvojem M2M komunikacija, jedan od globalnih

ciljeva u telekomunikacijama postaje kreiranje novih i unapređenje postojećih komunikacionih tehnologija, u cilju obezbjeđivanja Internet konekcije sve većem broju uređaja (senzori, brojila, telefoni, “pametni” uređaji,...), čineći ih dijelom *Internet of Things* (IoT) mreže. IoT predstavlja izuzetno izazovan i zahtjevan koncept o kom je još 1999. godine pisao Kevin Ashton, opisujući ga kao veoma moćan i efikasan [1]. Najjednostavnije opisano, IoT predstavlja sistem koji čine različiti tipovi uređaja i senzora, samostalni, ili kao dio određenog sklopa ili materije, koji su povezani pomoću raznih žičnih ili bežičnih komunikacionih sistema, i tako umreženi čine osnov za razmjenu informacija i podataka, a samim tim i za kreiranje aplikacija i servisa koji bi se zasnivali na obradi i korišćenju prikupljenih podataka. Prve analize su predvidjele da će do 2020.godine desetine milijardi “pametnih” uređaja biti uvezani u IoT mrežu [2], što je umnogome usmjerilo telekomunikacione kapacitete ka razvoju aplikacija namijenjenih IoT i M2M sistemima. I skorija istraživanja i analize potvrđuju rast i predviđaju konstantan razvoj IoT i M2M mreža i aplikacija: analiza IoT platforme prikazana u [3] predviđa da će do 2025. god. čak 75,4 milijarde uređaja biti dio IoT koncepta (slika 1.1), dok predikcija IoT tržišta, prezentovana u [4], predviđa da će IoT tržište doseći 1 567 milijardi dolara, takođe do 2025. godine (slika 1.2).



Slika 1.1 Predikcija broja povezanih IoT uređaja



Slika 1.2 Predikcija IoT tržišta

Novi telekomunikacioni koncept je značajno uticao i na globalno telekomunikaciono tržište, primoravajući industriju i servis provajdere na traženje isplativih i efikasnih komunikacionih rješenja u skladu sa IoT i M2M zahtjevima. S obzirom na prirodu IoT i M2M sistema, koji podrazumijevaju povezanost ogromnog broja različitih, udaljenih uređaja, bežični komunikacioni sistemi su od posebnog interesa za obezbjeđivanje neophodne konektivnosti. Pametni telefoni, tableti, različiti senzori, digitalne kamere i drugi uređaji mogu biti povezani korišćenjem komunikacionih tehnologija koje rade u nelicenciranim djelovima frekvencijskog spektra, kao što su LoRa (*Long Range*), SigFox, Wi-Fi (*Wireless-Fidelity*), Bluetooth, Zigbee, i dr., ili preko mobilnih 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) komunikacionih sistema, kao što su EC-GSM (*Enhanced Coverage Global System for Mobile Communications*), LTE-M (*Long Term Evolution – Machine Type Communications*), NB-IoT (*Narrowband IoT*) i 5G (*Fifth Generation*), koje koriste licencirani dio spektra. Najveći broj M2M i IoT mreža čine uređaji koji se napajaju baterijama skromnih kapaciteta, zbog čega zahtijevaju energetski efikasna bežična komunikaciona rješenja za prenos podataka na većim rastojanjima. Optimizacija i prilagođavanje bežičnih komunikacija takvom scenariju usmjerili su dalji razvoj bežičnih tehnologija, među kojima posebno atraktivne postaju tehnologije koje rade u nelicenciranom frekvencijskom opsegu ispod 1GHz (S1G - *sub-1 GHz*). Propagacija na frekvencijama ispod 1 GHz omogućava veće domete i bolju pokrivenost zbog povoljnijih propagacionih karakteristika na nižim frekvencijama. *Low-Power Wide-Area Network*

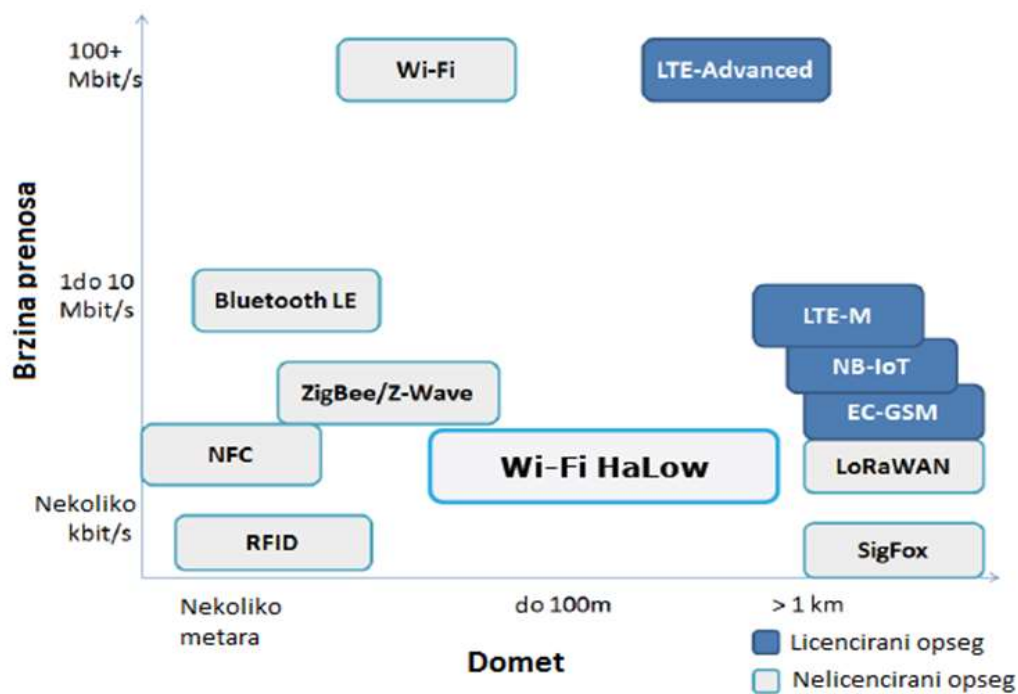
(LPWAN) tehnologije, LoRa i SigFox, su primjeri bežičnih komunikacionih tehnologija koje rade u opsegu ispod 1 GHz i koje su uglavnom namijenjene M2M i IoT sistemima [5]. Primjenom ovih komunikacionih tehnologija ostvaruju se komunikacioni dometi od 2 do 5 km, u gustim urbanim sredinama (LoRa), odnosno do čak 50 km u ruralnom okruženju (SigFox), ali za veoma male brzine prenosa podataka, oko 100 b/s [5].

Funkcionisanje u nelicenciranom dijelu frekvencijskog spektra, pristupačnost, jednostavnost i skalabilnost su karakteristike WLAN (*Wireless Local Area Network*) mreža, zbog kojih je njihova primjena veoma široka, pa se nameću kao obećavajuće rješenje i za M2M i IoT aplikacije. Lider na polju standardizacije savremenih WLAN mreža je 802.11 grupa, u okviru komiteta 802, Instituta inženjera elektrotehnike i elektronike (IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Tehnologije koje razvija IEEE 802.11 grupa se popularno nazivaju i “Wi-Fi” tehnologije, po organizaciji koja, na osnovu specifikacija IEEE 802.11 standarda, vrši sertifikaciju WLAN uređaja. Kako bi bili kompetitivni na novom telekomunikacionom tržištu i odgovorili zahtjevima M2M i IoT aplikacija, IEEE 802.11 grupa je kreirala, i u maju 2017. godine, usvojila IEEE 802.11ah standard, prvi IEEE 802.11 standard koji radi u nelicenciranim frekvencijskim opsezima ispod 1 GHz. Nelicencirani opsezi ispod 1 GHz, pored standardne namjene za industrijske, naučne i medicinske potrebe (S1G ISM - *sub-1 GHz Industrial, Scientific and Medical*) mogu se koristiti i u telekomunikacione svrhe, za razvoj obećavajućih IEEE 802.11 *outdoor* komunikacionih rješenja. Razvoj prvog WLAN standarda operativnog na frekvencijama ispod 1 GHz počeo je 2010. godine, u okviru IEEE 802.11ah radne grupe (TGah - IEEE 802.11ah *Task Group*) [6]. Kako većina M2M i IoT aplikacija podrazumijeva povezivanje stotine i hiljade uređaja sa udaljenom pristupnom tačkom (AP - *Access Point*), generišući sporadičan saobraćaj manjih protoka, TGah se orjentisala na specifikaciju mreže koja će omogućiti povezivanje do 6000 uređaja sa jednom pristupnom tačkom (AP), na rastojanjima do 1 km, obezbjeđujući brzine prenosa ne manje od 100 kb/s, [7].

IEEE 802.11 grupa je IEEE 802.11ah amandman (amandman na IEEE 802.11-2007 standard), poznat i kao “Wi-Fi HaLow”, razvila na temelju postojećih Wi-Fi tehnologija i prateći nove zahtjeve. Wi-Fi HaLow tehnologija je bazirana na OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) tehnologiji prenosa i, u odnosu na prethodne IEEE 802.11 standarde, donosi modifikacije i prilagođenja na fizičkom nivou i nivou linka, koje, uz benefite propagacije na frekvencijama ispod 1 GHz, treba da učine IEEE 802.11ah konkurentnim komunikacionim rješenjem za M2M i IoT aplikacije. Optimizacija na fizičkom i nivou linka

omogućava veću fleksibilnost i širok spektar primjene, počevši od tradicionalnih WLAN aplikacija, pa do scenarija koji podrazumijevaju ostvarivanje većih dometa za veliki broj energetski ograničenih uređaja. Za razliku od drugih IEEE 802.11 standarda (a, b, g, n, ac) koji rade u 2.4 i 5 GHz frekvencijskim opsezima i koji su optimizovani za mreže sa ograničenim brojem uređaja i većim brzinama prenosa podataka, IEEE 802.11ah podržava mreže koje povezuju veći broj uređaja, manje brzine prenosa i komunikaciju na većim rastojanjima zahvaljujući: benefitima propagacije na nižim frekvencijama, fleksibilnijim širinama kanala (od 1 MHz do 16 MHz), robustnim modulacionim i šemama kodiranja (MCS - *Modulation and Coding Scheme*), kraćim MAC (*Medium Access Control*) frejmom i drugim modifikacijama na link nivou [6], kao i mogućnošću primjene kooperativnih komunikacija, tačnije relejne stanice, sa ciljem povećanja ostvarivih dometa [8].

Slika 1.3 ilustruje poziciju IEEE 802.11ah standarda u odnosu na druge bežične komunikacione tehnologije, kada su u pitanju ostvarivi dometi i brzine prenosa podataka. Slika jasno upućuje na svrhu uvođenja ovog standard, a to je kreiranje ekonomične i efikasne tehnologije prilagođene IoT i M2M komunikacionim zahtjevima, koja se, kao što je već pomenuto, u najvećem dijelu odnose na manje brzine prenosa podataka i veće domete.



Slika 1.3 Poređenje IoT komunikacionih rješenja

Suštinski, IEEE 802.11ah standard predstavlja kompromisno rješenje između tradicionalnih Wi-Fi rješenja i LPWAN tehnologija koje rade u frekvencijskom opsegu ispod 1 GHz. IEEE 802.11ah omogućava komunikaciju na većim rastojanjima (do 1 km), ali ostvaruje manje brzine prenosa u odnosu na prethodna IEEE 802.11 rješenja, dok u komparaciji sa LPWAN sistemima, IEEE 802.11ah obezbeđuje manje domete, ali brzinu prenosa od najmanje 100 kb/s, što je veća brzina od maksimalno ostvarivih u LoRa sistemima i značajno veća od 100 b/s, što predstavlja brzinu koja je karakteristična za SigFox tehnologiju [5].

S obzirom na svrhu uvođenja IEEE 802.11ah standarda i drugačije namjene u odnosu na prethodna WLAN rješenja, ispitivanja i testiranja realnih performansi sistema je od početka bilo značajno, upravo zbog promjena na fizičkom nivou i nivou linka. I prije izlaska prvog drafta IEEE 802.11ah standarda, koji je izdat u oktobru 2013.godine, istraživačka zajednica je pokazala interesovanje za performanse novog WLAN standarda, nakon čega se interesovanje usmjerilo ka rješenjima za poboljšanje performansi [9-17]. Ostvarivi dometi u IEEE 802.11ah sistemima u slučaju kada su razmatrani samo efekti srednjeg slabljenja uslijed propagacije za različite MAC i MCS šeme su analizirani u [9], prikazujući da u razmatranim scenarijima maksimalni domet ide i do 1550 m, pri predajnoj snazi od 1 W. Ispitivanje validnosti predloženih IEEE 802.11ah modela srednjeg slabljenja signala uslijed propagacije za aplikacije u urbanim “pametnim” mrežama bila je tema u [10], dok su ostvarive brzine prenosa podataka u kanalima sa *shadow* fadingom u *outdoor* okruženju, za različite modulacione i koding šeme, veličine pakete i vjerovatnoće ispada linka, istraživane u [11]. Zauzetost kanala, odnos isporučenih paketa, kašnjenja, energetska potrošnja i brzine prenosa u predmetnim Wi-Fi sistemima za dva *indoor* (pametna mjerenja i industrijska automatizacija) i dva *outdoor* scenarija primjene su analizirani u [12]. Protoci u IEEE 802.11ah sistemima sa uključenim MAC mehanizmima su prezentovani u [13]. Sveobuhvatan pregled izazova i dostignuća kada je u pitanju obezbeđivanje komunikacije većih dometa u WLAN sistemima dat je u [14]. Kako podrobnija analiza ostvarivih dometa mora uključivati i analizu uticaja *multipath* fadinga u IEEE 802.11ah sistemima, u [15] su, simulacionim modelovanjem kanala sa Rejljevom *multipath* statistikom, evaluirani ostvarivi dometi na *downlink*-u i analizirana je vjerovatnoća greške po bitu (BER- *Bit Error Rate*) za najrobustnije MCS šeme u IEEE 802.11ah sistemima, uzimajući u obzir različite predajne snage. Dobijeni rezultati su potvrdili da su dometi do 1 km ostvarivi u slučaju *downlink* komunikacije za predajnu snagu od 1W i u scenarijima koji uključuju uticaj *multipath* fadinga. Međutim, u zavisnosti od geografskih regija i važeće regulative po državama, maksimalne predajne snage u IEEE 802.11ah sistemima mogu biti

ograničene na 10 mW, kao što je to slučaj u Evropi. Rezultati dobijeni u [9, 15] pokazuju da ograničenja po pitanju predajne snage i te kako utiču na ostvarive domete, onemogućavajući komunikaciju na željenim rastojanjima od 1 km, čak i u slučaju primjene najrobustnijih MCS šema. Dodatna ograničenja su evidentna i u slučaju *uplink* komunikacije, jer definisana predajna snaga krajnje stanice u IEEE 802.11ah sistemima je 1 mW. Zbog toga potrebno je bilo istražiti tehnike koje će poboljšati performanse sistema i opravdati inicijalna očekivanja.

Kooperativne komunikacije predstavljaju obećavajuće rješenje za poboljšanje performansi IEEE 802.11ah sistema, zbog čega su u fokusu ovog istraživanja, kao tehnika koja omogućava prevazilaženje identifikovanih ograničenja za obezbjeđivanje željenih dometa. Implementacija relejne stanice (RS – *Relay Station*) može povećati ostvarive domete [8, 13], unaprijediti pouzdanost prenosa podataka kada ne postoji optička vidljivost između komunikacionih stanica, i smanjiti energetske potrošnje krajnjih stanica. Specifikacije IEEE 802.11ah standarda predviđaju mogućnost implementacije “dekodiraj-i-prosljedi” (DF – *Decode-and-Forward*) relejne stanice u polu-dupleks režimu komunikacije [7]. Analitička evaluacija maksimalno ostvarivih dometa u IEEE 802.11ah sistemima i benefiti koji se mogu ostvariti implementacijom relejne stanice detaljno su prikazani u [8]. Neka od istraživanja primjene relejnih stanica u IEEE 802.11ah sistema se odnose na predloženi algoritam za minimizaciju potrošnje senzora u IEEE 802.11ah relejnim sistemima [16], dok je u [17] razmatrano povećanje protoka u dvosmjernoj komunikaciji (FDX - *Full Duplex*) u odnosu na polu-dupleks komunikaciju (HDX - *Half-Duplex*).

I nakon usvajanja IEEE 802.11ah standarda, istraživačka zajednica je nastavila sa izučavanjem karakteristika prve SIG Wi-Fi tehnologije, kao i tehnikama za unapređenje performansi. U fokusu najskorijih radova su modifikacije na MAC nivou, koje treba da unaprijede performanse sistema u pogledu protoka, energetske efikasnosti i konektivnosti. IEEE 802.11ah mehanizam ograničenog pristupa (RAW – *Restricted Access Window*) je uveden sa ciljem da, između ostalog, poveća protok i energetske efikasnost u gustim mrežama, tako što će podijeliti stanice u različite RAW grupe i omogućiti samo jednoj grupi da istovremeno pristupa kanalu. U [18] je demonstrirana sposobnost RAW mehanizma da podrži veliki broj gusto raspoređenih IoT stanica, sa heterogenim saobraćajnim zahtjevima. RAW mehanizam i uticaj na performanse bili su predmet istraživanja u [19], gdje su razmatrane performanse MAC nivoa kontrole pristupa diferenciranih QoS (*Quality of Service*) IoT stanica u IEEE 802.11ah RAW mehanizmu, procjenjujući izvodljivost koegzistencije prioritetnog i neprioritetnog saobraćaja na IoT uređajima, bez pogoršanja performansi mreže. Iako je

standard usvojen, još uvijek nije počela masovna proizvodnja *hardware*-a koji podržava IEEE 802.11ah standard. U [20] je predložena nova, OFDM-bazirana struktura prijemnika, koji radi u okruženju sa izraženim smetnjama. Predložena struktura prijemnika zasnovana je na neparametarskoj, najvjerovatnijoj estimaciji kanala, praćenju sa Viterbi dekodiranjem. Sveobuhvatan prikaz razvoja IEEE 802.11ah mreža i predviđanje mogućnosti i izazova buduće implementacije su prikazani u [21], sa akcentom na strategije optimizacije QoS IEEE 802.11ah mreža.

Imajući u vidu fleksibilnost, skalabilnost i širok spektar primjene IEEE 802.11ah sistema, istraživanje performansi je svakako izazovan i zahtjevan zadatak koji ima za cilj ispitivanje opravdanosti uvođenja IEEE 802.11ah, kao efikasnog komunikacionog rješenja za ispunjavanje M2M i IoT zahtjeva. Kako se najznačajnije promjene i prilagođenja prvog S1G IEEE 802.11 standarda odnose na karakteristike sistema na fizičkom nivou, sa ciljem obezbjeđivanja većih komunikacionih dometa, performanse od interesa u ovom radu su maksimalno ostvarivi dometi, ostvarive brzine prenosa podataka, kao i kvalitet prenosa podataka (vjerovatnoće greške po bitu/paketu) za scenarije koji obezbjeđuju maksimalne domete. Korišćenjem simulacionih i analitičkih metoda, uzimajući u obzir najrobustnije modulacije i šeme kodiranja, utvrđeni su maksimalno ostvarivi dometi u IEEE 802.11ah sistemima, a zatim analizirane i druge performanse od interesa. Kao što je rečeno, IEEE 802.11ah specificira različite predajne snage za različita područja, shodno regulatorskim uslovima, što u određenim scenarijima, kao npr. u Evropi, značajno ograničava opseg primjene novog standarda. Imajući to u vidu, težište ovog istraživanja je na analizi sistema koji su primijenjivi u Evropi, ograničenjima tih sistema i tehnikama za prevazilaženje ograničenja. Primjena kooperativne komunikacije je prepoznata kao efikasna tehnika za poboljšanje performansi IEEE 802.11ah sistema, pa je u okviru istraživanja uključena i analiza ostvarivih dometa i vjerovatnoće greške po bitu/paketu za IEEE 802.11ah DF relejne sisteme sa dvije dionice (DH - *Dual Hop*). U tom kontekstu istraživanje obuhvata evaluaciju performansi IEEE 802.11ah sistema u slučajevima direktne i *dual-hop* komunikacije između AP i krajnje stanice (ST – *Station*) u *outdoor* okruženjima, na *downlink*-u i *uplink*-u. Cilj je ispitati maksimalno ostvarive domete IEEE 802.11ah WLAN relejnih sistema u slučaju primjene parametara koji su definisani za region Evrope, kao i pokazati da dometi u IEEE 802.11ah sistemima mogu značajno prevazići maksimalne domete koji su ostvarivi u prethodnim WLAN sistemima.

Ostatak rada je koncipiran na sljedeći način. U okviru druge Glave predstavljen je osnovni koncept IEEE 802.11ah sistema, njegova namjena, mogući scenariji primjene i dat je

pregled osnovnih karakteristika na fizičkom nivou, sa akcentom na modifikacije koje su za cilj imale prilagođenje standarda zahtjevima specifičnih IoT i M2M scenarija primjene. U trećoj Glavi su analizirani maksimalno ostvarivi dometi u IEEE 802.11ah sistemima, u slučajevima direktne i relejne (*dual hop*) komunikacije između AP i krajnje stanice, uzimajući u obzir *downlink* (DL) i *uplink* (UL) komunikaciju. Ostvarivi dometi su računati primjenom simulacionog modela kreiranog u Matlabu. Rezultati prezentovani u ovoj Glavi daju jasnu sliku o opravdanosti i primjenljivosti ovih sistema u IoT aplikacijama, čiji zahtjevi su bili motivi za uvođenje IEEE 802.11ah standarda. U okviru ovog dijela, analitički su analizirane odgovarajuće brzine prenosa na rastojanjima bliskim teorijski maksimalno ostvarivim dometima, radi sveobuhvatne analize IEEE 802.11ah sistema i spoznaje realnih mogućnosti i potencijala ovih sistema. Četvrta Glava je posvećena analizi vjerovatnoće greške po bitu (BER) u IEEE 802.11ah sistemima. I ovdje su razmatrani slučajevi direktne i *dual-hop* komunikacije između AP i krajnje stanice (ST), na *downlink*-u i *uplink*-u. Analiza je sprovedena kreiranjem simulacionog modela u Matlabu, u okviru kojeg su korišćeni odgovarajući parametri, kao i modeli komunikacionih kanala koji su relevantni za IEEE 802.11ah komunikacione procese i scenarije. Vjerovatnoća greške po paketu (PER – *Packet Error Rate*), kao performansa od praktične važnosti u sistemima koji podrazumijevaju paketski prenos podataka radio kanalima sa prisutnim fadingom, je analizirana u petoj Glavi. U ovom dijelu analitički je ispitan PER u nekodiranim IEEE 802.11ah sistemima za različite, standardom definisane, scenarije primjene. Odgovarajući modeli propagacije, fading efekti i modulacione šeme su korišćene za definisane scenarije. U poslednjoj Glavi su sumirani rezultati i data zaključna razmatranja.

Glava 2

IEEE 802.11ah sistemi: koncept, namjena i pregled karakteristika na fizičkom nivou

WLAN standard koji specificira komunikaciju u nelicenciranim frekvencijskim opsezima ispod 1 GHz je novitet u odnosu na koncept tradicionalnih bežičnih lokalnih mreža, koji je najčešće podrazumijevao funkcionisanje na 2.4 i 5 GHz nelicenciranim frekvencijskim opsezima. Prostiranje radio signala na nižim frekvencijama karakteriše manje srednje slabljenje i bolja penetracija kroz prepreke tipa zid, staklo i sl., omogućavajući značajno povećanje dometa, što je jedan od osnovnih zahtjeva M2M i IoT aplikacija, posebno ako se oslanjaju na infrastrukturu senzorskih i aktuatorskih bežičnih mreža. Pored benefita propagacije na frekvencijama ispod 1 GHz, na ostvarivanje većih dometa utiču i druge promjene na fizičkom nivou koje uvodi IEEE 802.11ah standard. Komunikacija na radio kanalima manje širine, kao i nova modulaciona i koding šema, čine prvu S1G Wi-Fi tehnologiju robustnijom u odnosu na prethodne Wi-Fi tehnologije, dok se fleksibilnošću po pitanju izbora parametara, posebno modulacionih i koding šema, zadržava mogućnost primjene u konvencionalne WLAN svrhe.

Osim povećanja dometa zahtjevi M2M i IoT baziranih aplikacija su i energetski efikasni komunikacioni procesi, prenos manje količine podataka i mogućnost povezivanja velikog broja (do nekoliko hiljada) stanica/senzora/uređaja sa jednom pristupnom stanicom (AP). U cilju ispunjavanja ovih zahtjeva, IEEE 802.11ah optimizuje protokole i karakteristike na nivou linka ili MAC nivou. Kraći MAC i menadžment frejmovi i smanjenje MAC zaglavlja skraćuju aktivno vrijeme predajnika i prijemnika, a IEEE 802.11ah uvodi i mehanizme na MAC nivou koji obezbjeđuju povećanje vremena u režimu mirovanja (*stand-by*). Dodatno, modifikacije na MAC nivou utiču na redukovanje vremena za pristup kanalu, ublažavanje

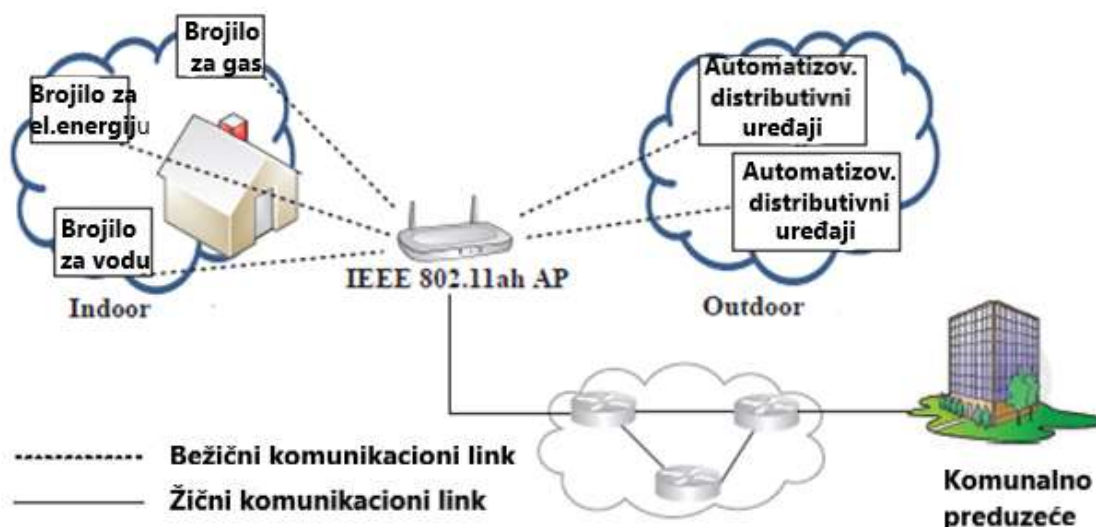
uticaja fedinga, mogućnost implementacije releja i obezbjeđivanje konektivnosti velikom broju krajnjih stanica, prilagođavajući tehnologiju IoT zahtjevima.

2.1. Scenariji primjene

Motivi koji su inspirisali i usmjerili razvoj prvog S1G WLAN standarda bili su zahtjevi savremenih IoT sistema za obezbjeđivanje komunikacionih rješenja potrebnih za kreiranje aplikacija koje su bazirane na povezivanju velikog broja udaljenih senzora, brojila, pametnih uređaja, kamera i drugih tipova IoT uređaja i prenosu male količine podataka ka udaljenim serverima. Modifikacije koje su specificirane u okviru IEEE 802.11ah standarda otvaraju prostor za njegovu primjenu u aplikacijama i sistemima koji su produkt modernih telekomunikacionih izazova i zahtjeva. Tokom procesa standardizacije, IEEE 802.11ah radna grupa je prepoznala neke od najizvjesnijih i najrealnijih aplikacija koje mogu koristiti performanse i benefite S1G Wi-Fi tehnologije i na osnovu komunikacionih zahtjeva klasifikovala je tri generalna scenarija primjene IEEE 802.11ah tehnologije:

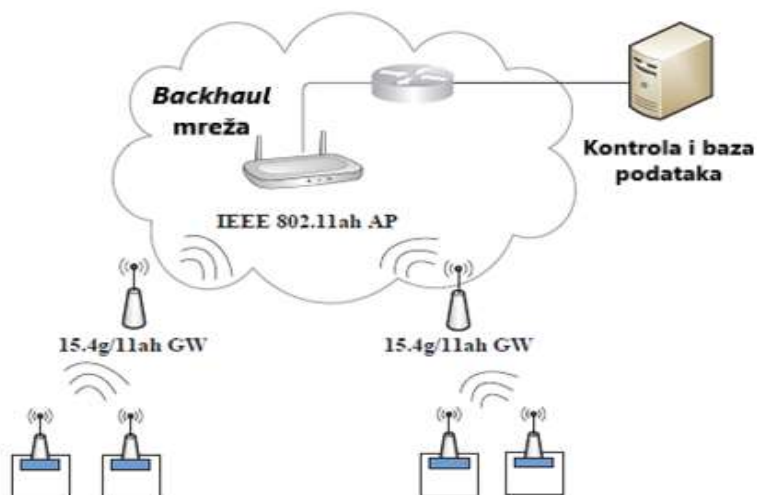
- umrežavanje senzora i brojila,
- *backhaul* agregacioni linkovi i
- WLAN povećanog dometa i celularni *off-loading* [13].

Implementacija IEEE 802.11ah sistema za aplikacije koje podrazumijevaju povezivanje i prikupljanje podataka od senzora, brojila ili mjerača, predstavlja najperspektivniji scenario primjene S1G WLAN rješenja (slika 2.1). Aplikacije zasnovane na tom principu imaju širok dijapazon praktične primjene: pametna mjerenja, nadzor okoline, optimizacija i monitoring u poljoprivredi, pametne mreže, autonomija industrijskih procesa, *indoor* zdravstveni i fitness sistemi i dr. Nova robustna modulaciona i šema kodiranja, zajedno sa benefitima propagacije na frekvencijama ispod 1 GHz, čine IEEE 802.11ah tehnologiju veoma konkurentom za obezbjeđivanje pouzdane komunikacije u bežičnim senzorskim mrežama (WSN- *Wireless Sensor Networks*), jer nadmašuje druga WSN komunikaciona rješenja koja rade u nelicenciranim frekvencijskim opsezima, kao što su ZigBee i Bluetooth, u pogledu ostvarivih dometa i brzina prenosa, zadržavajući potreban nivo energetske efikasnosti [22].



Slika 2.1 Primjer za scenario primjene: Senzorske mreže i pametna brojila

Primjena IEEE 802.11ah tehnologije za *backhaul* agregacione linkove je posljedica potrebe za prenosom agregiranih podataka, prikupljenih od uređaja, senzora ili stanica, koje koriste druge komunikacione tehnologije manjih dometa, ka udaljenim serverima [23]. Tehnologije, poput Zigbee, koje su masovno korišćene za komunikaciju i prikupljanje podataka u industrijskim sistemima, predstavljale su energetske efikasno rješenje, sa prilično ograničenim mogućnostima kada su u pitanju brzine prenosa podataka i dometi. Zbog toga korišćenje IEEE 802.11ah baziranih linkova (koji omogućavaju domete i do 1 km) za prenos prikupljenih podataka ka udaljenim serverima, predstavlja efikasno komunikaciono rješenje i za te namjene (slika 2.2).

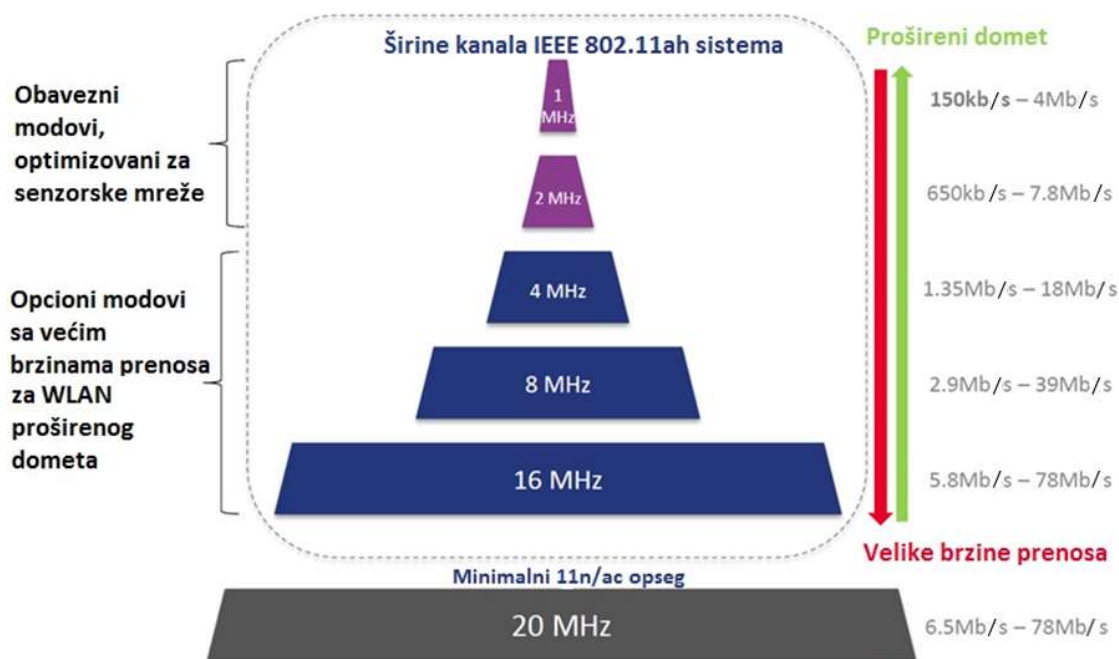


Slika 2.2 Scenario primjene: *Backhaul* agregacioni linkovi

S obzirom na sve veću potrebu za povećanjem dometa WLAN mreža, kao i sve veću eksploataciju i opterećenje mobilnih mreža, fleksibilna IEEE 802.11ah tehnologija može naći svoju primjenu i u povećanju *hotspot* ili WLAN dometa, kao i u obezbjeđivanju *off-loading* saobraćaja u mobilnim ili celularnim mrežama [24]. *Off-loading* saobraćaja podrazumijeva upotrebu komplementarne bežične tehnologije, koja radi na nelicenciranim frekvencijskim opsezima, za prenos podataka koji su namijenjeni mobilnim mrežama, kako bi se smanjilo opterećenje licenciranog spektra. Prethodne Wi-Fi tehnologije (poput IEEE 802.11n i IEEE 802.11ac) mogu obezbijediti brzine prenosa koje nijesu manje od brzina ostvarivih u 3G/4G mobilnim mrežama, ali nedovoljni dometi onemogućavaju primjenu tih tehnologija za potrebe *off-loading* saobraćaja. Izborom adekvatnih parametara i prilagođavanjem zahtjevima za *off-loading* saobraćaja, prvo S1G WLAN rješenje se prepoznaje kao tehnologija koja može biti korišćena i u ove svrhe, posebno u državama u kojima su S1G kanali slobodniji i regulativa omogućava primjenu više različitih parametara i veće predajne snage, kao u SAD.

2.2. Karakteristike na fizičkom nivou

IEEE 802.11ah amandman je zasnovan na OFDM tehnologiji i osnovnu strukturu na fizičkom nivou je naslijedio od IEEE 802.11ac/n standarda, prilagodivši je komunikaciji na frekvencijama ispod 1 GHz. Cilj S1G WLAN standarda je da ponudi robustno i efikasno komunikaciono rješenja za potrebe M2M i IoT baziranih aplikacija, čiji su zahtjevi, u najvećem broju slučajeva, komunikacije većih dometa, manjih brzina prenosa i ograničenih energetske kapaciteta. Osim prostiranja signala u nelicenciranom dijelu spektra na frekvencijama ispod 1 GHz, povećanje ostvarivih dometa u IEEE 802.11ah sistemima je omogućeno i korišćenjem radio kanala manje širine, što implicira manju vjerovatnoću uticaja frekvencijski selektivnog fadinga i za posljedicu ima povećanje odnosa signal/šum (SNR – *Signal to Noise Ratio*) na prijemu. U odnosu na prethodna IEEE 802.11 rješenja, koja su definisala minimalnu širinu kanala od 20 MHz, IEEE 802.11ah standard podržava komunikaciju na kanalima širine 1, 2, 4, 8 i 16 MHz (slika 2.3) [25]. Obavezujuće je da IEEE 802.11ah oprema podržava kanale širine 1 i 2 MHz, dok su ostali, širi kanali, ostavljeni kao opcija.



Slika 2.3 Širine kanala u IEEE 802.11ah sistemima

Broj podnosioca u kanalu širine 1 MHz je 26 po jednom OFDM simbolu (2 pilot podnosioca i 24 podnosioca za prenos podataka), a u širim kanalima, broj pilot tonova i tonova za prenos podataka (fiksni, putujućih) se povećava (56 za širinu kanala od 2 MHz, pa do 484 podnosioca za širinu kanala od 16 MHz). Frekvencijski razmak između susjednih podnosioca je 31.25 kHz, za sve širine kanala [9]. Ovo čini da je period inverzne diskretne Furijeove transformacije (IDFT- *Inverse Discrete Fourier Transform*) jednak 32 μ s, što je 10 puta duže nego u IEEE 802.11ac sistemima. Period trajanja OFDM simbola je 40 μ s, uključujući zaštitni interval (GI – *Guard Interval*) (36 μ s sa kraćim GI). Tabela 2.1 daje pregled MCS šema i ostvarivih brzina prenosa podataka za različite primijenjene širine kanala, [13].

Osim fleksibilnosti kada su u pitanju širine komunikacionih kanala, IEEE 802.11ah predviđa mogućnost korišćenja deset različitih modulacionih i koding šema (MCS) i podržava do četiri različita prostorna toka (strima). Sve to zajedno omogućava širok raspon ostvarivih dometa i brzina prenosa podataka, što IEEE 802.11ah standard može učiniti konkurentnim komunikacionim rješenjem prilikom razvoja različitih aplikacija. Tabela 2.1 prikazuje MCS koje specificira IEEE 802.11ah standard i teorijski dobijene brzine prenosa po jednom prostornom toku, koje je moguće ostvariti za određene MCS i širine kanala [13]. Brzine prenosa podataka, prikazane u Tabeli 2.1, su za SISO (*Single Input Single Output*) sisteme, dok

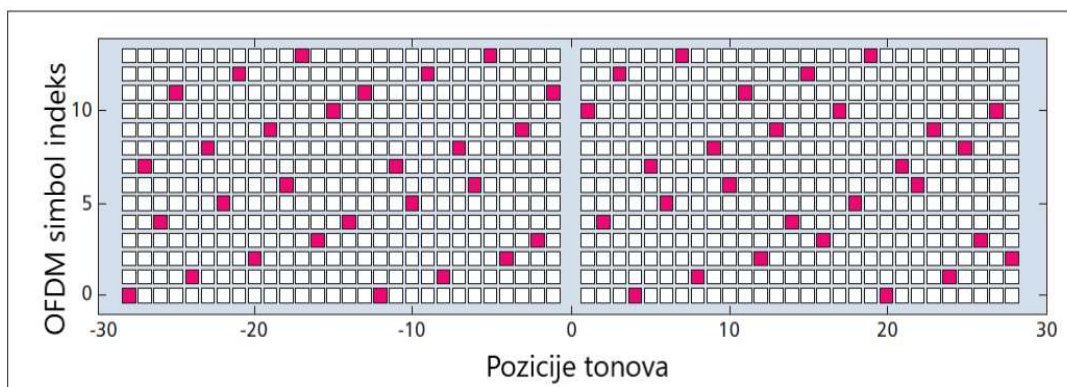
su maksimalno ostvarive brzine prenosa i do četiri puta veće, zbog mogućnosti implementacije četiri različita prostorna toka, pa je maksimalna brzina prenosa u IEEE 802.11ah sistemima oko 347 Mb/s za 256 kvadraturnu amplitudsku modulaciju (QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*) sa kodnim odnosom 5/6, na kanalu širine 16 MHz. Treba napomenuti da u poređenju sa prethodnim Wi-Fi tehnologijama, IEEE 802.11ah uvodi novu modulacionu i koding šemu, MCS10, koja podrazumijeva kodiranje ponavljanjem slanja istog simbola dva puta, BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) modulaciju i kodni odnos 1/2, parametre koji povećavaju robustnost sistema i obezbjeđuju ostvarivanje najvećih dometa u IEEE 802.11ah sistemima.

Tabela 2.1. MCS i ostvarive brzine prenosa za 1MHz, 2MHz i 16MHz širine kanala i jedan prostorni tok

	Modul.	Kodni odnos	1MHz (Mb/s)	2MHz (Mb/s)	16MHz (Mb/s)
MCS0	BPSK	1/2	0.30	0.65	6.5
MCS1	QPSK	1/2	0.60	1.3	13
MCS2	QPSK	3/4	0.90	1.95	19.5
MCS3	16QAM	1/2	1.2	2.6	26
MCS4	16QAM	3/4	1.8	3.9	39
MCS5	64QAM	2/3	2.4	5.2	52
MCS6	64QAM	3/4	2.7	5.85	58.5
MCS7	64QAM	5/6	3	6.5	65
MCS8	256QAM	3/4	3.6	7.8	78
MCS9	256QAM	5/6	4	N/A za 1 prostorni tok	86.67
*MCS10	BPSK	1/2	0.15		

*uključuje tehniku za povećanje dometa, slanjem istog simbola 2 puta

S obzirom na to da je IEEE 802.11ah standard uglavnom namijenjen IoT *outdoor* komunikaciji, koja uslijed mobilnosti okruženja može imati izražen *Doppler*-ov pomjeraj, estimacija karakteristika kanala treba biti ažurirana za svaki poslati paket, zbog čega IEEE 802.11ah uvodi šemu putujućih pilot tonova u cilju poboljšanja estimacije kanala [26]. Kako bi se ažurirala estimacija radio kanala za sve pozicije podnosilaca podataka u OFDM simbolu, šema putujućih pilota mijenja pozicije pilot tonova u OFDM simbolu. Slika 2.4 ilustruje pozicije pilota u OFDM simbolima za kanal širine 2 MHz, kada je broj prostorno-vremenskih tokova 1. U ovom slučaju, obrazac putujućih pilota se ponavlja svakih 14 OFDM simbola.



Slika 2.4 Pozicije putujućih pilot tonova u OFDM simbolima za $B=2$ MHz i jedan prostorni tok (crveni kvadrati - pilot tonovi; bijeli kvadrati –tonovi za podatke)

Osjetljivost prijemnika, ili minimalna snaga signala potrebna za detektovanje (MDS-*Minimum Detectable Signal*), u IEEE 802.11ah sistemima ide od -98 dBm, za BPSK modulaciju sa kodnim odnosom $1/2$ i kodiranje ponavljanjem slanja simbola na kanalu širine 1 MHz (ili MCS10), pa do -58 dBm, za 256 QAM modulacija sa kodnim odnosom $5/6$ na kanalu širine 16 MHz, [27]. MCS0, najrobustnija modulaciona i kodirajuća shema poslije MCS10, je takođe u fokusu ovog istraživanja. MDS za MCS0 i kanal širine 1MHz, iznosi -95 dBm, a za kanal širine 2 MHz je jednak -92 dBm.

Kako IEEE 802.11ah sistemi rade u nelicenciranim frekvencijskim opsezima ispod 1 GHz, koji su namijenjeni komunikacijama za industrijske, naučne i medicinske svrhe (SIG ISM), specificirani operativni parametri (frekvencijski opsezi, predajne snage, širine kanala) su različiti od regije do regije, ili čak od države do države, zavisno od regulatorski uslova za određene države. Istraživanja koja su rađena tokom i nakon procesa standardizacija, kao i literatura koja je izdata u vezi sa prvim SIG WLAN standardom, predviđaju različite predajne snage za različite regije ili države. IEEE 802.11ah sistemi koje je moguće implementirati u Evropi, Kini i Južnoj Koreji specificiraju maksimalnu predajnu snagu od 10 mW, dok je u SAD ta granica 1 W. U Japanu je moguće koristiti predajne snage od 1 mW, 20 mW ili 250 mW, dok je za Singapur specificirana maksimalna snaga od 500 mW. U Tabeli 2.2 su prikazani i drugi parametri (frekvencijski opsezi i širine kanala) definisani za različite regije i države. Analiza performansi IEEE 802.11ah sistema umnogome zavisi od parametara koje je moguće primijeniti, pa će performanse biti različite za sisteme u različitim regijama, ili državama. U cilju sveobuhvatnije analize, potrebno je razmotriti performanse različitih realnih sistema, s

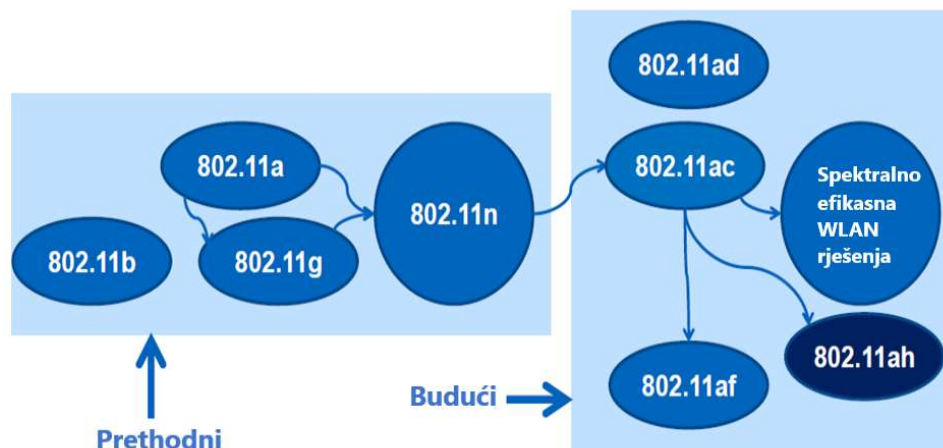
tim što je u ovom istraživanju akcenat stavljen na performanse sistema koje je moguće razvijati u Evropi, s obzirom na izazove u vezi sa prevazilaženjem ograničenja u ostvarivanju inicijalno ciljanih dometa i performansi.

Tabela 2.2. IEEE 802.11ah spektar i širine kanala

Geografska regija	Frekvencijski opseg [MHz]	<i>B</i> [MHz]
Kina	614-787; 779-787	1
Evropa	863-868.6	1; 2
Japan	915.9-929.7	1
Singapur	866-869; 920-925	1; 2; 4
Južna Koreja	917-923.5	1; 2; 4
SAD	902-928	1-16

2.3. IEEE 802.11ah i drugi IEEE 802.11 standardi

IEEE 802.11 grupa je globalni lider kada je u pitanju standardizacija bežičnih lokalnih mreža. Specificiranjem karakteristika i protokola na fizičkom i MAC nivou, IEEE 802.11 standardi i amandmani određuju pravce razvoja lokalnih bežičnih tehnologija i kreiraju uslove za sertifikaciju opreme od strane Wi-Fi alijanse. Počev od 1997. godine, kada je usvojen prvi IEEE 802.11 standard, pa u narednih 20 godina, 802.11 radna grupa je razvila pet generacija standarda na kojima je baziran razvoj Wi-Fi tehnologija, i to su IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac standardi, a u 2021. godini očekuje se usvajanje i šeste generacije, koja se odnosi na IEEE 802.11ax standard. Paralelno su razvijani i drugi amandmani (c-f,i,j), koji su imali za cilj unapređenje specifikacija postojećih standarda, a često su uključivali i ispravke prvobitnih specifikacija. Period razvoja pet generacija IEEE 802.11 standarda karakteriše veliki porast zastupljenosti WLAN mreža, o čemu svjedoči broj proizvedenih Wi-Fi uređaja, koji se povećao sa jedne milijarde u 2009. godini na čak 30 milijardi u 2019. godini, [28]. Tokom razvoja prethodnih Wi-Fi tehnologija, akcenat je uvijek bio na povećanju brzine prenosa podataka kroz upotrebu širih bežičnih kanala, većeg broja prostornih tokova i modulacija višeg nivoa [6].



Slika 2.5. Razvoj IEEE 802.11 standarda

Prvi IEEE 802.11 standard koji je našao širu primjenu je IEEE 802.11b, specificirajući parametre koji su omogućavali protoke do 11 Mb/s. Nakon toga, IEEE 802.11 grupa unapređuje specifikacije omogućavajući povećanje ostvarivih brzina prenosa, što 2003. godine rezultira predstavljanjem IEEE 802.11g standarda. Usvajanjem OFDM modulacione tehnike, IEEE 802.11g omogućava da brzine prenosa podataka idu i do 54 Mb/s. Kontinuitet povećanja ostvarivih protoka nastavljen je 2009. godine, usvajanjem IEEE 802.11n standarda, koji obezbjeđuje brzine prenosa podataka do 600 Mb/s koristeći MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) tehniku više antenskih sistema, uz maksimalno četiri prostorna toka podataka (strima) i udvostručujući širinu kanala na 40 MHz. IEEE 802.11b i IEEE 802.11g standardi koriste 2.4 GHz ISM frekvencijski opseg, dok IEEE 802.11n definiše korišćenje 2.4 i 5 GHz nelicenciranih frekvencijskih opsega. Amandman koji je usvojen 2013. godine, IEEE 802.11ac, definiše funkcionisanje samo na opsegu od 5 GHz, ali za razliku od IEEE 802.11a standarda koji radi u istom opsegu, podrazumijeva komunikacione kanale veće širine. IEEE 802.11ac podržava brzine prenosa podataka do 6.9 Gb/s, a za poboljšanje performansi sa stanovišta brzine prenosa podataka, pored funkcionisanja na 5 GHz opsegu, zaslužno je povećanje širine kanala na 80 i 160 MHz, kao i mogućnost korišćenja 8 prostornih tokova. IEEE 802.11ah standard je prvi S1G IEEE 802.11 standard koji preusmjerava razvojne prioritete od povećanja protoka ka povećanju dometa i pouzdanosti, zadržavajući mogućnost primjene u određenim konvencionalnim WLAN scenarijima primjenom modulacija višeg reda i opcijom korišćenja do 4 prostorna toka.

U Tabeli 2.3 prikazane su modulacione tehnike, a u Tabeli 2.4 parametri i performanse IEEE 802.11 standarda, uključujući i IEEE 802.11ah amandman.

Tabela 2.3. Modulacione i koding tehnike u IEEE 802.11 standardima

Tehnika	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n	802.11ac	802.11ah
BPSK	✓				✓	✓
QPSK	✓				✓	✓
DBPSK		✓	✓			
DQPSK		✓	✓			
16-QAM	✓		✓			✓
64-QAM	✓		✓	✓	✓	✓
256-QAM					✓	✓
CCK		✓			✓	
Alamouti				✓		
OFDM	✓		✓	✓	✓	✓
DSSS		✓				

Tabela 2.4. Parametri IEEE 802.11 standarda

Standard	Frekvencija [GHz]	Brzine prenosa [Mb/s] za 1 prostorni tok	Domet
802.11a	5	54	do 120 m
802.11b	2.4	11	do 120 m
802.11g	2.4	54	do 140 m
802.11n	2.4/5	150	do 250 m
802.11ac	5	866.25	do 100m
802.11ah	< 1	0.1 – 86.67	do 1000m

Slobodni resursi u nelicenciranom dijelu ISM spektra ispod 1 GHz su prilično ograničeni, zbog čega funkcionisanje u tom opsegu nije pogodno za sisteme koji treba da omoguće velike brzine prenosa podataka, pa IEEE 802.11ah nije amandman koji održava kontinuitet povećanja ostvarivih protoka u IEEE 802.11 sistemima. S druge strane, propagacija na nižim frekvencijama povećava ostvarive domete i čini komunikaciju pouzdanijom u odnosu na tradicionalne WLAN mreže, koje rade na nelicenciranim frekvencijskim opsezima od 2.4 i 5 GHz. Poređenje budžeta linka za S1G WLAN standard i najzastupljeniji WLAN standard (IEEE 802.11n) prikazano je u Tabeli 2.5 i jasno pokazuje poboljšanja određenih parametara koja su omogućena IEEE 802.11ah specifikacijama i koja favorizuju taj standard u odnosu na

tradicionalne IEEE 802.11 standarde, kada su u pitanju pouzdanije komunikacije većih dometa [6].

Tabela 2.5. Komparacija budžeta linka za IEEE 802.11ah i IEEE 802.11n standarde

Parametri	Procjena poboljšanja budžeta linka za IEEE 802.11ah u odnosu na IEEE 802.11n standard
Srednje slabljenje signala	+8.5 dB
Širina kanala šuma	+10 dB
Širina kanala (1 MHz)	+3 dB
Ponavljjanje simbola (MCS10)	+3 dB
UKUPNO	+24.5 dB

Primjenom benefita propagacije u S1G opsezima i modifikacijama na fizičkom i MAC nivou IEEE 802.11ah je amandman kojim IEEE 802.11 grupa nudi konkurentno rješenje za IoT i M2M bazirane aplikacije.

Glava 3

Analiza ostvarivih komunikacionih dometa u IEEE 802.11ah sistemima

Propagacija signala na frekvencijama ispod 1 GHz, kao i korišćenje znatno užih širina kanala u odnosu na druga WLAN rješenja, uz druge modifikacije koje je IEEE 802.11 grupa uvela sa prvim S1G WLAN standardom, prevashodno imaju za cilj povećanje maksimalno ostvarivih komunikacionih dometa. Upravo je kao jedan od ciljeva S1G WLAN standarda definisan domet do 1 km, kako bi ova mreža postala konkurentna za različite aplikacije sve prisutnijih IoT i M2M sistema. Analiza maksimalnih dometa u IEEE 802.11ah sistemima podrazumijeva analizu komunikacionog procesa u slučajevima primjene najrobustnijih modulacionih i koding šema (MCS0 i MSC10) koje su definisane standardom, pa je fokus istraživanja upravo na tim scenarijima.

Prvo je razmatran opseg ostvarivih dometa u slučajevima direktne (SH -*single hop*) komunikacije, primjenjujući standardom specificirane parametre, koji se razlikuju u zavisnosti od pravila regulatora za različite kontinente ili države. Razmatrani su slučajevi *downlink* i *uplink* komunikacije, uzimajući u obzir oba definisana modela *outdoor* srednjeg slabljena signala, kao i *multipath* efekte koji u Wi-Fi sistemima značajno utiču na performanse. Ostvarivi komunikacioni dometi su analizirani na osnovu rezultata dobijenih simulacijom IEEE 802.11ah sistema u Matlabu.

Nelicencirani frekvencijski resursi ispod 1 GHz su prilično ograničeni u skoro svim državama, zbog čega je ograničen i izbor parametara koje je moguće koristiti u IEEE 802.11ah sistemima i zavisi od regulatorskih uslova. Pokazaće se da parametri IEEE 802.11ah sistema, koji su specificirani za primjenu u Evropi, ne omogućavaju ostvarivanje željenog dometa od 1

km, što je povod za uvođenje kooperativne komunikacije, tačnije implementaciju releja u IEEE 802.11ah sistemima. Maksimalno ostvarivi dometi IEEE 802.11ah relejnog sistema sa dvije dionice (DH - *dual hop*) su takođe predmet ove analize, u okviru koje su evaluirani rezultati dobijeni simulacijom komunikacionih modela u Matlabu. Konkretno, u okviru treće Glave analizirani su ostvarivi dometi u slučaju:

- direktne *uplink* i *downlink* komunikacije u IEEE 802.11ah sistemima uzimajući u obzir uticaj srednjeg slabljenja uslijed propagacije;
- direktne *uplink* i *downlink* komunikacije u IEEE 802.11ah sistemima uzimajući u obzir uticaj srednjeg slabljenja uslijed propagacije i *multipath* fading efekata;
- *dual-hop uplink* i *downlink* komunikacije u IEEE 802.11ah relejnim sistemima uzimajući u obzir uticaj srednjeg slabljenja uslijed propagacije;
- *dual-hop uplink* i *downlink* komunikacije u IEEE 802.11ah relejnim sistemima uzimajući u obzir uticaj srednjeg slabljenja uslijed propagacije i multipath fading efekata.

Poglavlje je zaokruženo analizom brzina prenosa podataka pri maksimalno ostvarivim dometima, što je pokazalo da su brzine prenosa veće od minimalno projektovane brzine od 100 kb/s, dok god je prijemna snaga signala veća od minimalne snage potrebne za detektovanje (MDS – *Minimum Detectable Signal*).

3.1. Ostvarivi dometi pri direktnoj komunikaciji

Početni prikaz ostvarivih dometa u IEEE 802.11ah sistemima dat je analizom najjednostavnijeg komunikacionog sistema koji podrazumijeva direktnu komunikaciju između komunikacionih stanica i uključuje samo srednje slabljenje koje nastaju uslijed prostiranja u slobodnom prostoru. U takvim sistemima snaga signala na prijemu se računa na osnovu jednačine (3.1), koja definiše budžet linka, i za razmatrani scenario se računa kao:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} - PL(d) + G_{rx} \quad (3.1)$$

gdje su P_{rx} i P_{tx} prijemna i predajna snaga, respektivno, izražene u dBm, a G_{tx} i G_{rx} su dobiti antena na predajnoj, odnosno, prijemnoj strani, izraženi u dBi. $PL(d)$ (*Path Loss*) predstavlja

srednje slabljenje signala u zavisnosti od rastojanja d i računa se u dB. Ovaj scenario ne uključuje gubitke koji mogu nastati u tehničkim sklopovima predajnika i prijemnika.

Modeli komunikacionih radio kanala koji su primjenjivi u analizama IEEE 802.11ah sistema predviđaju dva, standardom specificirana, modela za proračun srednjeg slabljenja signala uslijed prostiranja u slobodnom prostoru, a to su makro (*macro*) i piko (*pico*) propagacioni modeli [10]. *Macro* propagacioni model u *outdoor* okruženju računa srednje slabljenje signala uslijed prostiranja u scenariju u kojem se antena pristupne tačke (AP) nalazi na visini od 15 m iznad krova. Srednje slabljenje signala, izraženo u dB, koje predviđa takav model prostiranja, računa se po formuli:

$$PL(d) = 8 + 37.6 \cdot \log_{10}(d) \quad (3.2)$$

gdje je d rastojanje u metrima, a centralna frekvencija je 900 MHz.

Drugi, *Pico/Hot*, propagacioni model slabljenja u *outdoor* okruženju, primjenjuje se u slučaju kada se antena pristupne tačke nalazi na nivou visine krova, i srednje slabljenje (izraženo u dB) na rastojanju d se računa kao:

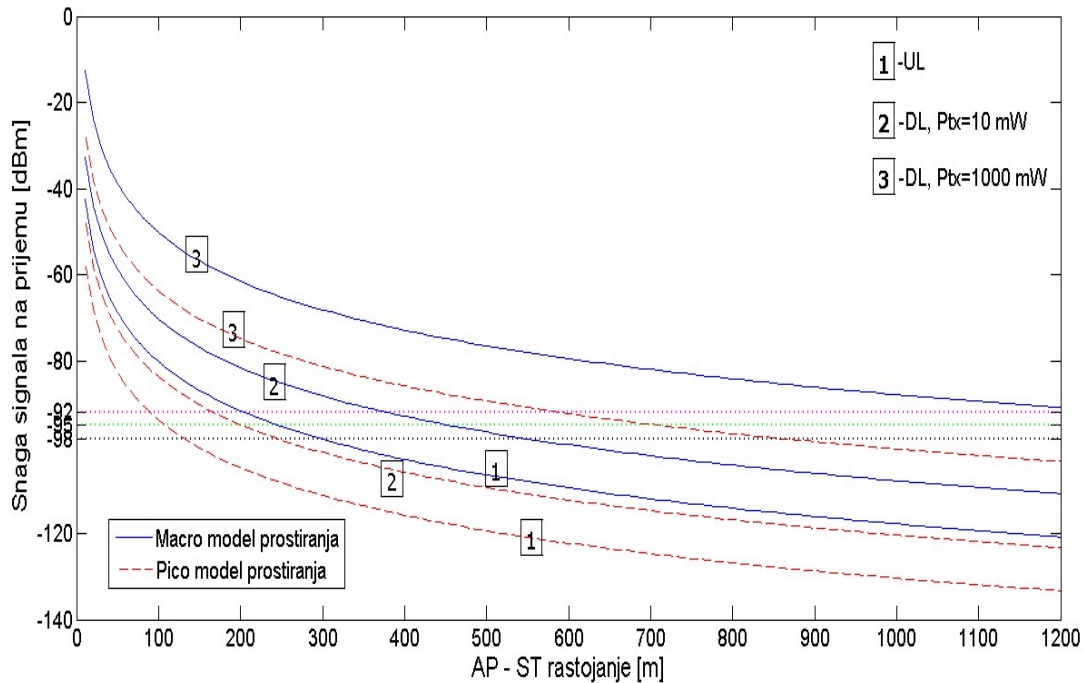
$$PL(d) = 23.3 + 36.7 \cdot \log_{10}(d) \quad (3.3)$$

Modelovanjem adekvatnih propagacionih uslova u Matlabu i primjenom parametara definisanih standardom (Tabela 3.1) računati su nivoi prijemnih snaga u zavisnosti od rastojanja između pristupne tačke i stanice (ST – *Station*) i dobijeni rezultati su prikazani na slici 3.1. Analizirani su slučajevi *downlink* i *uplink* komunikacije, pri čemu je dobitak antene na strani IEEE 802.11ah stanice 0 dBi i snaga kojom emituje 1 mW, dok su u slučaju *downlink* komunikacije uzete u obzir dvije vrijednosti predajne snaga (10 mW i 1 W) koje figuriraju u okviru IEEE 802.11ah specificiranih parametara, pri čemu je dobitak antene pristupne tačke (AP) jednak 3 dBi. Oba propagaciona modela, *macro* i *pico*, su uzeta u obzir tokom simulacije. Kako je cilj proračunati maksimalne domete signala u IEEE 802.11ah sistemima, podrazumijeva se primjena najrobustnijih modulacionih i šema za kodiranje: MCS0, uz komunikaciju na kanalu širine 2 MHz, MCS0 na kanalu širine 1 MHz i MCS10. Minimalni nivoi snage potrebni za detektovanje prijemnog signala (MDS) koji je modulisan navedenim MCS šemama su: -92 dBm, -95 dBm i -98 dBm, respektivno.

Tabela 3.1 Parametri IEEE 802.11ah sistema

Predajna snaga (mW)	AP	10, 1000
	ST	1
Dobitak antene (dBi)	AP	3
	ST	0
Model srednjeg slabljenja	<i>macro, pico</i>	
Multipath feeding	Rejli	
Modulaciona i koding šema	MCS10, MCS0	
Širina kanala (MHz)	1, 2	

Slika 3.1 pokazuje da je ciljani domet od 1 km u IEEE 802.11ah sistemima, za sve tri razmatrane MCS, ostvariv jedino u slučaju *downlink* komunikacije za *macro* propagacioni model, kada je snaga koju emituje AP jednaka 1 W, što je specificirano za SAD. U drugom razmatranom slučaju *downlink* komunikacije, kada je predajna snaga 10 mW, koja je definisana sa područje Evrope, maksimalno ostvarivi domet je 550 m, za *macro* propagacioni model i najrobustniju modulacionu i koding šemu, MCS10. Dobijeni rezultati jasno upućuju na to da su uslovi koji definiše *macro* propagacioni model značajno povoljniji za prostiranje signala od *pico* uslova, što implicira da je prilikom projektovanja IEEE 802.11ah sistema važno adekvatno pozicionirati komunikacione stanice. Što se tiče *uplink* komunikacije očekivano je da ostvarivi dometi budu manji od ciljanih, s obzirom na to da je predajna snaga stanice 1 mW. Maksimalni domet za UL komunikaciju je 300 m u slučaju *macro* propagacionog modela za MCS10, dok je za isti MCS, primjenom *pico* propagacionog modela, koji realnije opisuje uslove propagacije u određenim scenarijima primjene IEEE 802.11ah sistema, domet svega 140 m. Rezultati koji su prikazani na slici 3.1 u potpunosti korenspodiraju sa analitički dobijenim rezultatima za maksimalno ostvarive domete direktne komunikacije u IEEE 802.11ah sistemima koji su prikazani u [8], a odnose se na iste propagacione uslove koji su ovdje razmatrani.



Slika 3.1. Ostvarivi dometi uzimajući u obzir srednje slabljenje uslijed prostiranja

Rezultati na slici 3.1 su dobijeni uzimajući u obzir samo uticaj srednjeg slabljenja uslijed prostiranja signala na ostvarive domete u IEEE 802.11ah sistemima, kako bi se stekla okvirna slika o ostvarivim dometima. Kako su Wi-Fi sistemi podložni uticaju fedinga, posebno *multipath* fedinga, realnija i preciznija analiza mora uključiti i efekte *multipath* fedinga na domete u IEEE 802.11ah sistemima.

U slučaju kada u komunikacionom sistemu postoji i uticaj *multipath* fedinga, proračun za budžet linka (3.1) mora uključivati i komponentu koja modeluje gubitke zbog fedinga, tj. marginu fedinga (FM – *Fade Margin*):

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} - PL(d) + G_{rx} - FM \quad (3.4)$$

gdje je FM izražena u dB.

Margina fedinga predstavlja projekciju slabljenja signala koja se mora uzeti u obzir kako bi se obezbijedio određen nivo pouzdanosti u komunikacionim kanalima sa fedingom.

U [8] je dat analitički proračun vrijednosti FM za različite vrijednosti vjerovatnoće ispada linka u slučaju Rejljevog *multipath* fedinga (Tabela 3.2), kao i analitički dobijeni

rezultati za maksimalno ostvarive domete, ako se pretpostavi da se AP-ST komunikacija odvija pod uticajem *multipath* fedinga sa Rejljevom (*Rayleigh*) statistikom.

Tabela 3.2 *FM* u Rejljevom feding kanalu

P_{out}	FM [dB]
1%	29.99
5%	12.89
10%	9.77
20%	6.51
40%	2.92

Analitički rezultati uticaja srednjeg slabljenja i *multipath* fedinga na ostvarive domete u IEEE 802.11ah iz [8] pokazuju da je ciljani domet od 1 km ostvariv u slučaju *downlink* komunikacije i standardom definisane maksimalne predajne snage od 1 W, ali samo za najrobustniju MCS10, dok su za ostale razmatrane MCS dometi kraći od 1 km. Maksimalni domet na *downlink*-u za scenarije koji uključuju parametre sistema definisane za Evropu, je oko 350 m, pri *macro* propagaciji i za MCS10. Analitički rezultati dobijeni u [8] pokazuju da su na *uplink* smjeru komunikacije ostvarivi dometi u slučaju uticaja Rejljevog fedinga oko 170 m i 80 m za *macro* i *pico* propagacione modele, respektivno, što je značajno manje od ciljanog dometa.

Tokom procesa standardizacije TGah je definisala *multipath outdoor* modele kanala za potrebe simulacije karakteristika SISO komunikacije u IEEE 802.11ah sistemima [29]. Definisani modeli se koriste za evaluaciju osnovnih karakteristika i odabir parametara (OFDM parametri, predajna snaga, kodiranje i modulacija) na fizičkom nivou. Svaki od modela kanala sastoji se od 4 ili 6 nezavisnih putanja signala, a svaku od putanja karakterišu fiksno kašnjenje i fiksna srednja snaga (Tabela 3.3), zajedno čineći profil raspodjele snage poslatog impulsa na strani prijema (PDP – *Power Delay Profile*) za razmatrani *multipath* model. Simulacija efekata *multipath* fedinga sa Rejljevom statistikom u Matlabu odrađena je primjenom dva različita PDP profila: Pješak A (*Pedestrian A*) i Tipični urbani (*Typical Urban*). U svim simulacijama pretpostavljena je statičnost krajnjih stanica, pa je podrazumijevani Doppler-ov pomjeraj jednak 0 Hz. Ostali parametri koji su korišćeni prilikom simulacije uticaja srednjeg slabljenja i *multipath* fedinga na direktnu komunikacije u IEEE 802.11ah sistemima prikazani su u Tabeli 3.1.

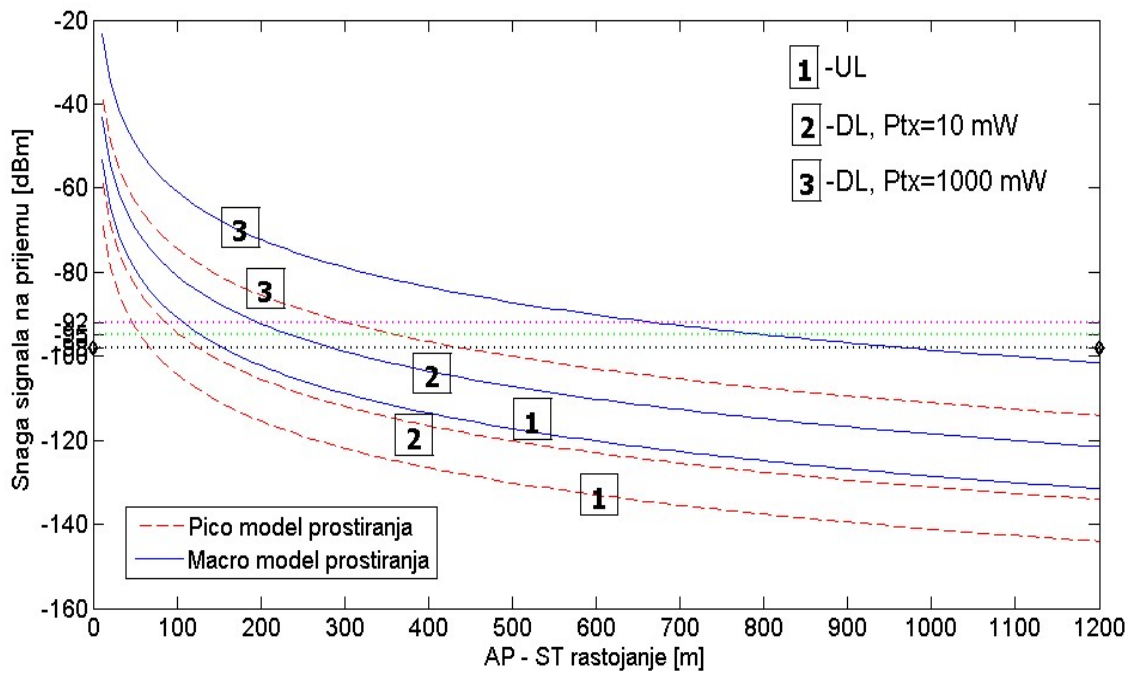
Tabela 3.3. PDP *multipath* modela kanala

PDP		Pedestrian A		Typical Urban	
Broj putanja		4		6	
Relativna snaga po putanji (dB)	Kašnjenje (ns)	0	0	-3	0
		-9.7	110	0	200
		-19.2	190	-2	600
		-22.8	410	-6	1600
				-8	2400
				-10	5000

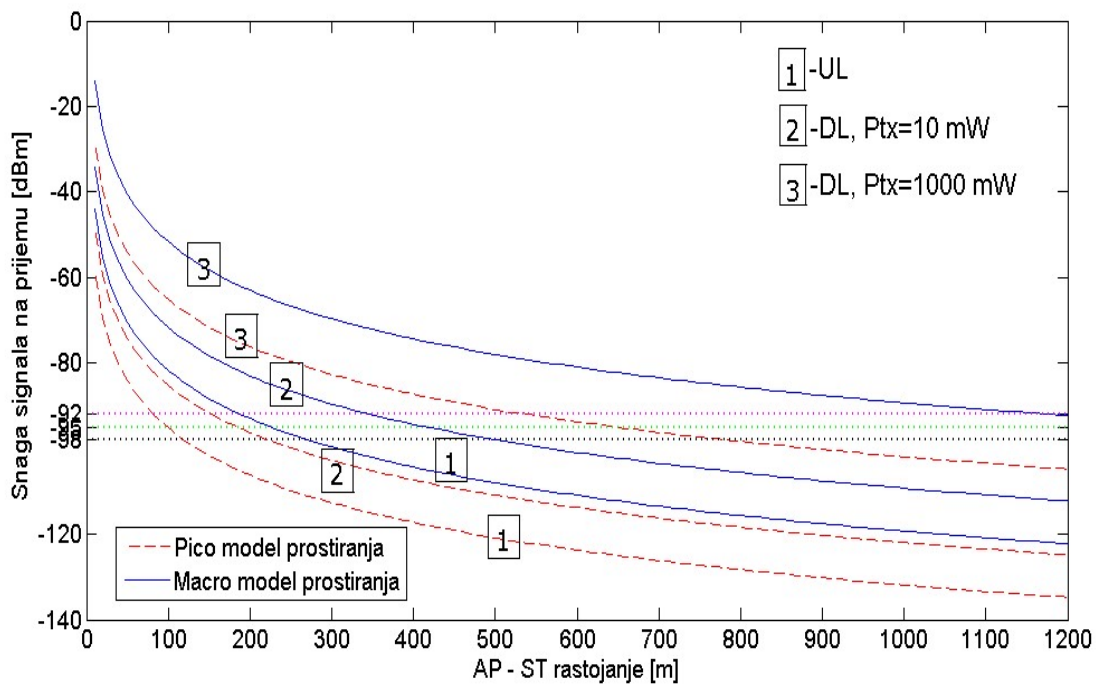
Kao što je i očekivano, efekti *multipath* fedinga dodatno smanjuju ostvarive domete u IEEE 802.11ah sistemima, što potvrđuju i rezultati prikazani na slici 3.2 i slici 3.3.

Rezultati simulacije kombinovanog uticaja srednjeg slabljenja uslijed prostiranja i *multipath* fedinga sa *Pedestrian A* PDP na snagu signala, u zavisnosti od AP – ST rastojanja, prikazani su na slici 3.2. Ostvarivi dometi u ovako modelovanom scenariju komunikacije su malo manji u odnosu na rezultate dobijene analitičkom evaluacijom dometa u Rejljevom *multipath* kanalu pri vjerovatnoći ispada linka od 0.1, [8]. U slučaju *downlink* komunikacije i predajne snage od 1 W, za najrobustniju MCS10 šemu, domet je 980 m, dok su za ostale razmatrane MCS dometi znatno kraći od 1 km. Maksimalni domet za *downlink* scenario koji je moguće implementirati u Evropi, iznosi 290 m pri *macro* propagaciji, za MCS10. *Multipath* efekti su redukovali i domete *uplink* komunikacije, omogućavajući domete do 150 m i 70 m, za *macro* i *pico* propagacione modele, respektivno.

Kada se Rejljev *multipath* feding modeluje primjenom *Typical Urban* PDP-a, ostvarivi dometi su veći nego u slučaju *Pedestrian A* PDP *multipath* modela i dometa izračunatih analitičkim putem (pretpostavljena vjerovatnoća ispada linka 0.1) [8]. Slika 3.3 pokazuje da *Typical Urban* Rejljevi feding efekti redukuju za oko 50 m domete, koji se otvaruju uzimajući u obzir samo srednje slabljenje uslijed prostiranja. Sa slike 3.3 se vidi da je ciljani domet od 1 km ostvariv u slučaju DL komunikacije i predajne snage od 1 W, za sve razmatrane MCS. Simulacioni rezultati DL komunikacije, kada je predajna snaga 10 mW, pokazuju da je najveći domet ostvariv pri *macro* propagaciji, za MCS10, i iznosi oko 490 m. Simulacija UL komunikacije u kanalu sa *Typical Urban multipath* efektima, pokazala je da je prijemna snaga veća od MDS na rastojanjima do 260 m i 120 m za *macro* i *pico* propagacione uslove, respektivno. Prevažilaženja ograničenja UL komunikacije predstavlja zahtjevan izazov u ispunjenju ciljeva IEEE 802.11ah standarda.



Slika 3.2. Ostvarivi dometi u IEEE 802.11ah sistemima u Rejljevom feding kanalu
(*Pedestrian A PDP*)



Slika 3.3. Ostvarivi dometi u IEEE 802.11ah sistemima u Rejljevom feding kanalu (*Typical Urban PDP*)

I rezultati dobijeni simulacijom IEEE 802.11ah modela u Matlabu, kao i analitički rezultati prikazani u [8], pokazuju da su dometi IEEE 802.11ah sistema svakako veći od dometa koji su ostvarivi u tradicionalnim WLAN rješenjima, koji koriste nelicencirane opsege oko 2.4 i 5 GHz. Rezultati takođe pokazuju da ostvarivi dometi zavise od parametara sistema, konkretno predajne snage, koja je različito specificirana u različitim regijama, shodno regulatorskim uslovima za korišćenje 5G nelicenciranog spektra. Ciljani dometi od 1 km, ostvarivi su samo za predajnu snagu od 1 W pri povoljnijim propagacionim i *multipath* efektima. Svi rezultati su pokazali nepovoljniji uticaj *pico* modela propagacije na ostvarive domete, što ukazuje na važnost optimalnog planiranja pozicije AP u IEEE 802.11ah sistemima. Modelovanje *multipath* efekata za različite PDP u Matlabu pokazalo je da ostvarivi dometi u *multipath* fading kanalima zavise i od okruženja, tačnije od uslova pod kojim nastaje fading, uzrokujući različita kašnjenja i slabljenja na prijemu. Rezultati su pokazali da je za ostvarivanje većih dometa povoljni uticaj *Typical Urban* PDP-a.

3.2. Ostvarivi dometi u relejnim sistemima

Rezultati analize maksimalno ostvarivih dometa u scenarijima direktne komunikacije AP-ST jasno upućuju na ograničenja IEEE 802.11ah sistema u odnosu na željene performanse. Ograničenja se u najvećoj mjeri odnose na komunikaciju na *uplink*-u i regulatorska ograničenje u određenim geografskim područjima, kao u Evropi, gdje je maksimalna dozvoljena predajna snaga 10 mW. Fokusirajući se upravo na te scenarije komunikacije, potrebno je bilo predložiti rješenje koje bi omogućilo povećanje ostvarivih dometa, i samim tim stvoriti uslove za širu primjenu IEEE 802.11ah standarda. U tom kontekstu kooperativna komunikacija, koja podrazumijeva implementaciju relejnih stanica (RS), je rješenje koje se nameće kao optimalno. Osim povećanja dometa, primjenom releja može se povećati i pouzdanost komunikacije između krajnjih stanica u slučajevima kada ne postoji optička vidljivost (NLoS – *Non Line of Sight*), a značajno se može poboljšati i energetska efikasnost krajnjih stanica [16]. Funkcije releja mogu biti različite, a neki od najčešće razmatranih protokola za kooperativne komunikacije u bežičnim kanalima koji definišu funkcije releja su: pojačaj-i-proslijedi (AF - *Amplify-and-Forward*), dekodiraj-i-proslijedi (DF - *Decode-and-Forward*), kao i inkrementalni AF i DF (IAF – *Incremental AF* i IDF - *Incremental DF*) [30]. Osim izvornog

modela kooperativnih mreža, koji uključuje postojanje jednog releja između krajnjih stanica, a koji je još poznat i kao model sa dvije dionice, ili dva hopa (DH - *dual-hop*), postoje modeli koji uključuju više releja ili takozvane *multi-hop* mreže.

IEEE 802.11ah specifikacije predviđaju mogućnost implementacije *dual-hop*, poludupleks relejnog sistema, pri čemu RS obavlja dekodiraj-i-proslijedi obradu signala [7], [17], pa je taj relejni sistem i analiziran. To bi praktično značilo da RS u prvom vremenskom slotu prima signal od AP, dekodira primljenu informaciju, a onda kodira prije prosljeđivanja informacije ka ST, u drugom vremenskom slotu. RS se stoga sastoji od dvije logičke cjeline, jer u odnosu na ST obavlja funkciju pristupne stanice, dok u komunikaciji sa AP ima ulogu krajnje stanice.

Scenariji koji će biti razmatrani podrazumijevaju da se cjelokupna komunikacija između AP i ST obavlja preko RS i da ne postoji direktna AP-ST komunikacija. Biće uzeti u obzir *downlink* i *uplink* komunikacija, najrobustnije MCS šeme i parametri prikazani u Tabeli 3.4. Kao i u slučaju direktne komunikacije, prvo će biti analiziran uticaj samo propagacionih efekata, a onda i kombinovan uticaj srednjeg slabljenja uslijed propagacije i *multipath* fedinga. Fokus je na sisteme koji su najkritičniji po pitanju ostvarivih dometa i koji podrazumijevaju da maksimalne predajne snage AP i RS budu 10 mW na *downlink*-u, dok je snaga koju emituje krajnja stanica 1 mW, za slučaj *uplink* komunikacije. Dobici antena AP i RS su 3 dBi, a dobitak antene krajnje stanice je 0 dBi. U cilju dobijanja što mjerodavnijih rezultata, sve analize relejnih komunikacija u ovom radu podrazumijevaće modelovanje realnih scenarija, prema kojim bi AP i njena antena uvijek bile pozicionirane tako da se komunikacija AP-RS odvija pod uticajem Rajsovog (*Rician*) *multipath* fedinga (Rajsov *K* faktor 9 dB) i da je *macro* model adekvatan *outdoor* propagacioni model za srednje slabljenje. Realan scenario za slučaj RS-ST komunikacije podrazumijeva modelovanje Rejljevog feding kanala i oba propagaciona modela. *Multipath* efekti su simulirani primjenom dva različita profila raspodjele snage na prijemu: *Pedestrian A* i *Typical Urban PDP*.

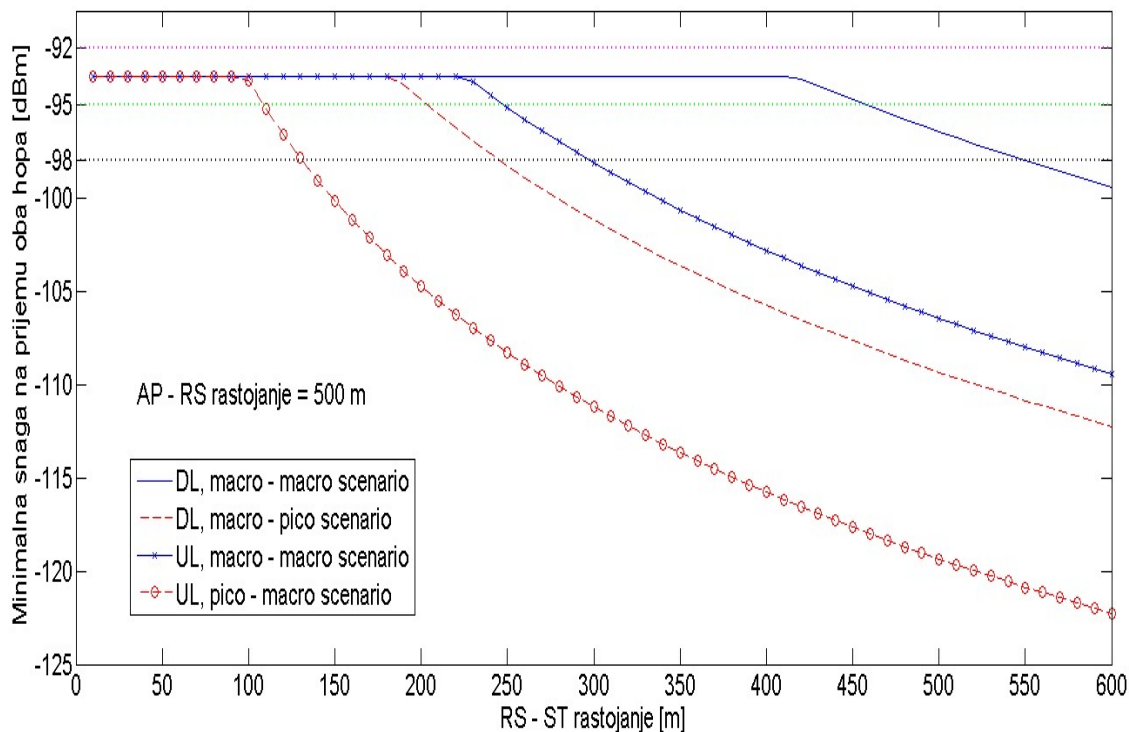
Simulacija *dual-hop* IEEE 802.11ah “dekodiraj-i-proslijedi” (DF) relejnih sistema odrađena je u Matlabu i rezultati simulacije uticaja srednjeg slabljenja uslijed prostiranja na ostvarive domete u IEEE 802.11ah *dual-hop* DF relejnim sistemima u slučajevima DL i UL komunikacije prikazani su na slici 3.4. Grafik na slici 3.4 prikazuje manju vrijednost od dvije snage koje su primljene na krajevima oba hopa, u funkciji rastojanja između RS i ST, dok je rastojanje između AP i ST konstantno i izabrano da bude 500m. Na slici su prikazani rezultati za sljedeće scenarije: DL i UP komunikaciju, kada je primijenjen *macro* propagacioni model

na oba hopa (“macro-macro”), zatim DL komunikacija kada je AP-RS link pod uticajem *macro* srednjeg slabljenja uslijed propagacije, a RS-ST modelovan *pico* uslovima (označen kao “DL, macro-pico model”) i četvrti scenario koji se odnosi na UL komunikaciju i podrazumijeva *pico* propagaciono slabljenje na prvom hopu, a *macro* na drugom.

Tabela 3.4 Parametri DH IEEE 802.11ah relejnih sistema

	AP – RS link		RS – ST link	
	Predajna snaga (mW)	AP	10	RS
	RS	10	ST	1
Dobitak antene (dBi)	AP	3	RS	3
	RS	3	ST	0
Multipath feding	Rajs ($K=9$ dB)		Rejli	
Modulaciona i koding šema	MCS10, MCS0		MCS10, MCS0	
Širina kanala (MHz)	1; 2		1; 2	

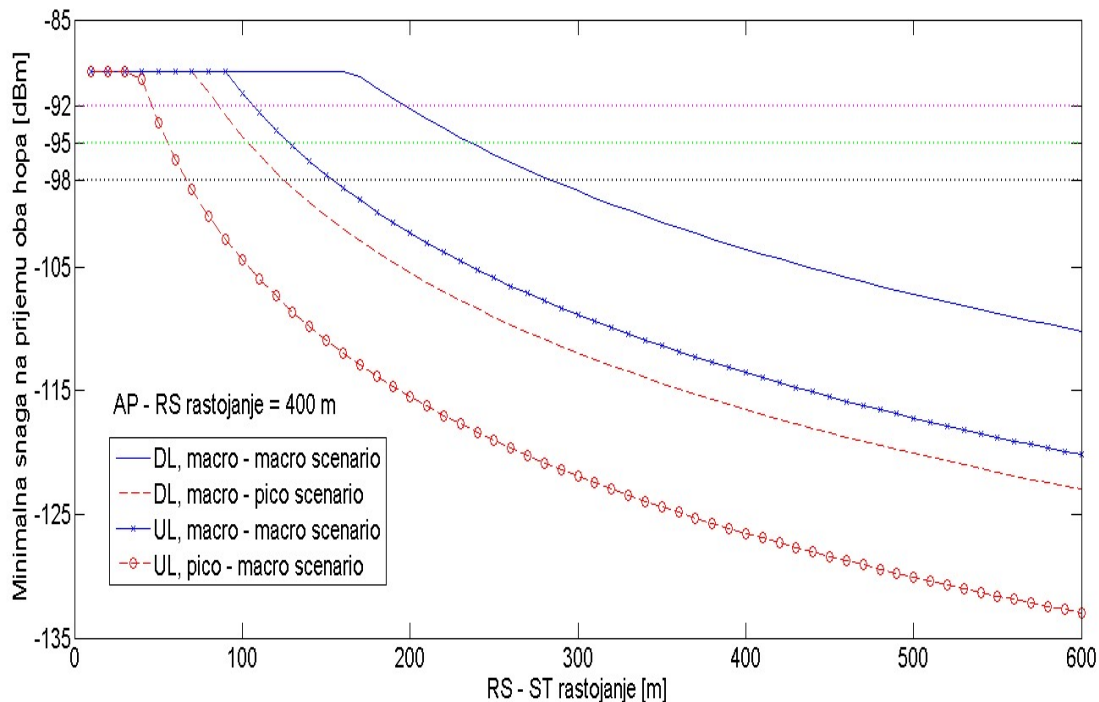
Maksimalno ostvarivi dometi koji su analizirani u slučaju direktne komunikacije između AP i ST i prikazani na slici 3.1 sada su povećani za rastojanje između AP i RS, koje je izabrano da bude 500 m. Sa slike 3.4 se vidi da sada, i u slučaju kada je predajna snaga 10 mW (evropski regulatorni standard), domet između AP i ST prelazi željenih 1 km, primjenjujući *macro* propagacione modele na oba hopa i najrobustniju MCS10. Rezultati simulacije pokazuju da *dual-hop* komunikacija utiče i na povećanje dometa na *uplink* smjeru komunikacije, omogućavajući maksimalni domet od oko 840 m, takođe primjenom *macro* propagacionih modela i MCS10 šeme. Izborom odgovarajuće pozicije relejne stanice, MCS0 ($B = 1$ MHz) šema takođe može biti realna opcija za razmatrana četiri moguća scenarija IEEE 802.11ah *dual-hop* sistema, omogućavajući domete koji su za 30-80 m kraći nego što su dometi ostvarivi za MCS10.



Slika 3.4. Ostvarivi dometi u IEEE 802.11ah relajnim sistemima, uzimajući u obzir srednje slabljenje uslijed prostiranja

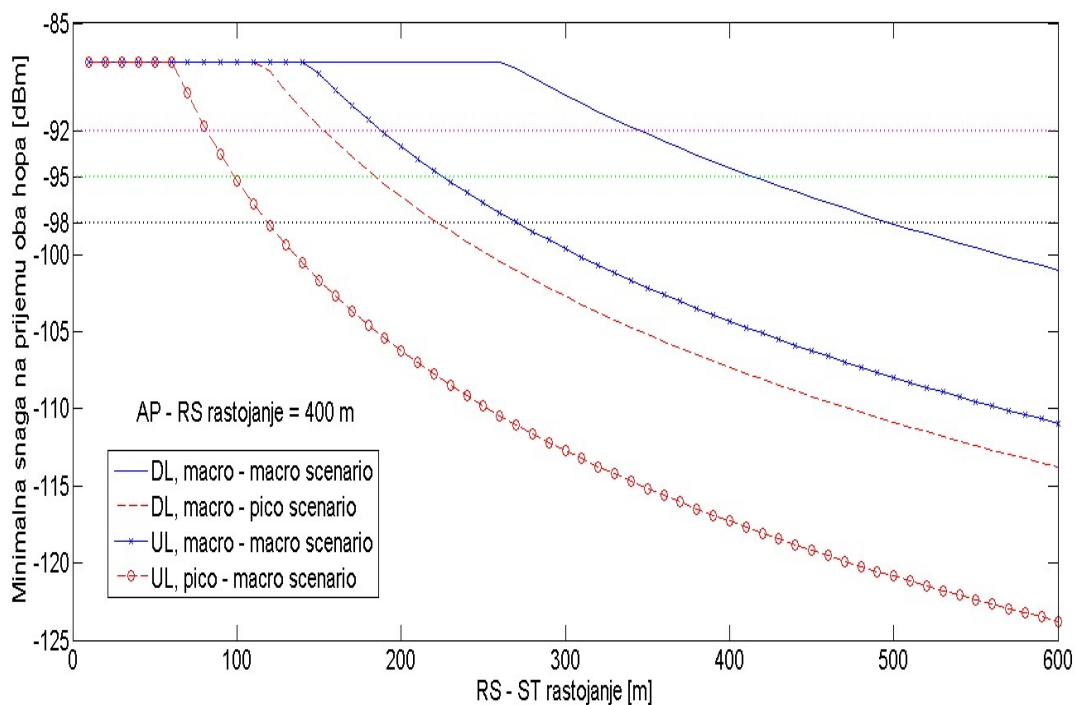
U daljoj analizi razmatran je i uticaj *multipath* fedinga na domete u *dual-hop* IEEE 802.11ah relajnim sistemima primjenjujući istu metodologiju kao prilikom analize direktne komunikacije i uzimajući u obzir parametre koji su prikazani u Tabeli 3.4.

Multipath efekti su prvo simulirani primjenom *Pedestrian A* PDP, koji predviđa četiri nezavisne putanje signala, sa fiksnim kašnjenjima i snagama na prijemu. Rezultati simulacije prikazani su na slici 3.5 i dobijeni su za AP-RS rastojanje 400 m. Maksimalni domet ovako modelovane komunikacije je 680 m (280m + 400m) za *macro* uslove propagacije na AP-RS i RS-ST linkovima. Kada pozicija RS uzrokuje *pico* model prostiranja na RS-ST linku, dometi postaju manji, omogućavajući komunikaciju na rastojanjima do 530 m (130 m + 400 m). Uticaji srednjeg slabljenja uslijed prostiranja i *multipath* efekata na domete *uplink* komunikacije su takođe simulirani za *macro* i *pico* modele ST-RS komunikacije, a dobijeni rezultati pokazuju da su maksimalni dometi na *uplink*-u 550 m (*macro-macro* model) i 470 m (*pico-macro* model).



Slika 3.5. Ostvarivi dometi u IEEE 802.11ah relejnim sistemima u *multipath* feding scenariju (*Pedestrian A PDP*)

Manji uticaj *multipath* efekata na ostvarive domete, dobijen je simulacijom *multipath* kanala sa *Typical Urban PDP*, koji implicira postojanje 6 nezavisnih putanja signala. Simulacioni rezultati sa slike 3.6 pokazuju da je maksimalni domet *downlink* komunikacije u razmatranom scenariju oko 890 m za MCS10, kada je srednje slabljenje uslijed prostiranja AP-RS i RS-ST komunikacije modelovano *macro* uslovima (*macro-macro* scenario). Koliko je važno optimalno planirati položaj RS i poziciju antene na RS pokazuje činjenica da se primjenom *pico* modela srednjeg slabljenja signala uslijed prostiranja na RS-ST linku domet smanjuje za oko 270m i iznosi 630 m (230 m + 400 m). Bolje performanse sistema primjenom *Typical Urban*, u odnosu na *Pedestrian A PDP* model, potvrđuju i simulacioni rezultati za *uplink* komunikaciju, jer su ostvarivi dometi oko 670 m (*macro-macro* scenario) i 520 m (*pico-macro* scenario). Simulacija feding efekata sa Rajsovom statistikom na AP-RS linku (za oba PDP), pri izabranom AP-RS rastojanju od 400 m, pokazuje da implementacija releja omogućava povećanje dometa za sve razmatrane MCS, ali i otvara prostor za povećanje ukupnog dometa povećanjem AP-RS rastojanja, uz adekvatno pozicioniranje RS antene.



Slika 3.6. Ostvarivi dometi u IEEE 802.11ah relejnim sistemima u *multipath* feding scenariju (*Typical Urban PDP*)

Sve prezentovane analize maksimalno ostvarivih dometa u *dual-hop* IEEE 802.11ah relejnim sistemima ukazuju na pozitivne efekte primjene kooperativnih komunikacija, tj. implementacije relejne stanice, što direktno doprinosi stvaranju uslova da novi WLAN standard postane konkurentno rješenje za IoT i M2M bazirane aplikacije. Analize su takođe pokazale da je implementacija efikasnog relejnog sistema uslovljena pažljivim pozicioniranjem relejne stanice, kako bi se ostvarila pouzdana komunikaciju između AP i RS, a samim tim i omogućili veći dometi.

3.3. Brzine prenosa podataka pri maksimalno ostvarivim dometima

IEEE 802.11ah standard specificira zahtijevanu brzinu prenosa podataka od najmanje 10^5 b/s, koju treba obezbijediti svim komunikacionim stanicama na kojima je snaga prijemnog signala iznad minimalne snage potrebne za dekodiranje signala (MDS). Jasno je da se

primjenom najrobustnijih modulacionih šema ostvaruju maksimalni komunikacioni dometi, dok se sa druge strane minimizuju ostvarive brzine prenosa podataka, u poređenju sa MCS šemama koje koriste modulacije višeg reda. Stoga, u nastavku su analitički evaluirane brzine prenosa podataka u IEEE 802.11ah sistemima, fokusirajući se na parametre sistema koji obezbjeđuju maksimalno ostvarive domete, u cilju provjere ispunjenosti zahtjeva da brzine prenosa ne budu manje od 10^5 b/s. Razmatrana je MCS0 modulaciona i koding šema, za $B=1$ MHz širinu komunikacionog kanal, koja je druga po redu najrobustnija MCS definisana za primjenu u IEEE 802.11ah sistemima. U odnosu na najrobustniju MCS10, MCS0 obezbjeđuje duplo veću brzinu prenosa, zbog činjenice da MCS10 primjenjuje tehniku ponavljanja slanja istog simbola dva puta. Kombinovanjem istih simbola na prijemu povećava se pouzdanost sistema, a samim tim i komunikacioni dometi, ali se smanjuju ostvarive brzine prenosa podataka u odnosu na MCS0.

Analiza brzine prenosa podataka u IEEE 802.11ah sistemima je prvo razmatrana za scenario direktne komunikacije između AP i ST, pretpostavljajući da dozvoljena vjerovatnoća greške po paketu (PER – *Packet Error Rate*) iznosi 10% (0.1) i da komunikacioni kanal podliježe uticaju Rejljevog *multipath* fedinga (FM prikazana u Tabeli 3.2), čije varijacije mogu izazvati ispad linka. Relacija koja povezuje brzine prenosa podataka i vjerovatnoću greške po paketu može se izvesti iz izraza za odnos signal/šum na ulazu u prijemnik:

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{S}{N_0 B} = \frac{E_b}{N_0 B T_b} = \frac{E_b R}{N_0 B}, \quad (3.5)$$

gdje je S snaga signala na prijemu, koja korenspodira linearnoj vrijednosti P_{rx} iz jednačine (3.4). E_b je energija po bitu, a T_b je interval trajanja bita. R je brzina prenosa podataka, a B je širina opsega sistema. Snaga šuma na prijemu, N , se računa kao:

$$N = N_0 B = k T_0 F B \quad (3.6)$$

N_0 je jednostrana spektralna gustina srednje snage šuma, k je Boltzmann-ova konstanta, T_0 je temperatura prijemnika izražena u Kelvinima (K) i F je faktor šuma prijemnika. Ako se izraz (3.5) prikaže u logaritamskom obliku i računa u dB, onda se transformiše u:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{dB} = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{dB} + 10 \log_{10} \left(\frac{R}{B}\right) \quad (3.7)$$

Kombinovanjem jednačina (3.4) i (3.7) dobija se izraz za maksimalno ostvarive brzine prenosa podataka u sistemu, R , u funkciji rastojanja d (u metrima) između predajnika i prijemnika:

$$(R(d))_{dB} = P_{tx} + G_{tx} - PL(d) - FM + G_{rx} - (E_b/N_0)_{dB} - N_0 \quad (3.8)$$

Relacija (3.8) daje maksimalno ostvarive brzine prenosa podataka, za zahtijevanu vjerovatnoću greške po bitu (BER). Tačnije, odnos E_b/N_0 je podešen da garantuje ispunjavanje zahtijevanog uslova za BER. Za BPSK modulaciju, koja je implementirana u MCS10 i MCS0 šemama, E_b/N_0 , za određenu vrijednost BER-a, se izvodi iz jednačine:

$$BER = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right), \quad (3.9)$$

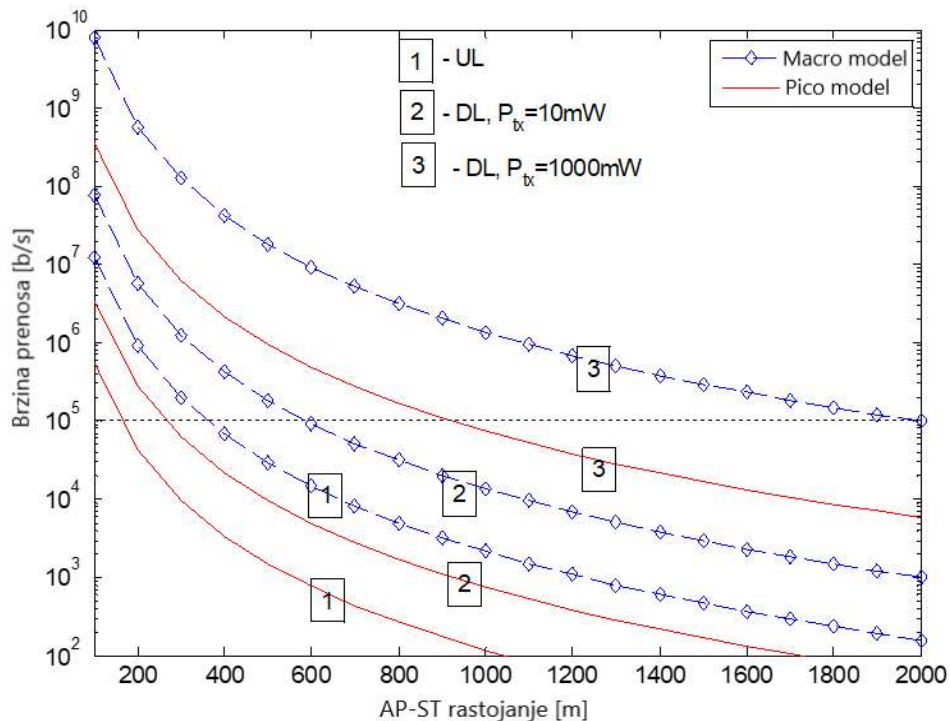
gdje je sa $Q(\cdot)$ označena Gausova Q funkcija.

U WLAN sistemima podaci se prenose u formi paketa. Ako se pretpostavi da su greške po paketima nezavisne i da se dešavaju sa istom vjerovatnoćom, primjenjuje se sledeća relacija koje povezuje BER i vjerovatnoću greške po paketu (PER):

$$PER = 1 - (1 - BER)^L \quad (3.10)$$

gdje L predstavlja veličinu paketa, ili broj bita (simbola) po paketu. U ovoj analizi, za sve razmatrane veličine paketa, podrazumijeva se da je krajnja (*end-to-end*) vjerovatnoća greške po paketu $PER=10\%$.

Na slici 3.7 prikazane su maksimalne brzine prenosa podataka za MCS0 šemu i širinu kanala $B=1$ MHz, u slučaju kada je $L=4096$ bajta, $PER=0.1$ i $P_{out}=0.1$.



Slika 3.7. Ostvarive brzine prenosa za MCS0 u 802.11ah sistemu – Rejljev feding scenario

Sa slike 3.7 se vidi da je, u razmatranim uslovima, željena brzina prenosa od 10^5 b/s na rastojanju od 1 km između AP i ST ostvariva za DL komunikaciju pri predajnoj snazi $P_{out}=1$ W, u slučaju propagacije definisane *macro* modelom prostiranja. Za *pico* model prostiranja i predajnu snagu od $P_{out}=1$ W, brzina prenosa od 10^5 b/s je ostvariva na rastojanjima većim od 900 m. Kada je predajna snaga pristupne tačke $P_{out}=10$ mW, zahtijevani protok, ne manji od 10^5 b/s, je ostvariv za AP-ST rastojanja manja od 600 m i 270 m, u slučaju *macro* i *pico* propagacionih modela, respektivno. U slučaju UL komunikacije, kada ST emituje snagom $P_{tx}=1$ mW, željeni protok je ostvariv na rastojanjima od 380 m i 180 m, za *macro* i *pico* uslove, respektivno.

Veći komunikacioni dometi, za istu zahtijevanu brzinu prenosa od 10^5 b/s, mogu se ostvariti kada paketi sadrže manji broj bita, i/ili implementacijom šema za kodiranje koje bi omogućile isti BER nivo za manje vrijednosti odnosa signal/šum na prijemu. Svakako, prethodno je pokazano da je implementacija releja najefikasnija tehnika za povećanje dometa u IEEE 802.11ah sistemima, pa su u nastavku analizirane ostvarive brzine prenosa *dual-hop* IEEE 802.11ah relejnih sistema, uzimajući u obzir različite veličine paketa i primjere nekodiranih i kodiranih sistema, u kanalima sa *multipath* fedingom.

Za razmatranu kooperativnu komunikaciju, zasnovanu na *dual-hop* DF relejnom protokolu, maksimalna krajnja brzina prenosa se računa kao:

$$R_{DF} = 0.5 \cdot \min\{R_1, R_2\}, \quad (3.11)$$

gdje je vrijednost 0.5 posljedica prenosa informacije od izvora do odredišta u dva vremenska slota, dok su R_1 i R_2 maksimalne brzine prenosa na prvom i drugom hop, respektivno. Relacija (3.11) u stvari pokazuje da je u *dual-hop* DF relejnim sistemima maksimalna krajnja (*end-to-end*) brzina prenosa podataka ograničena manjom od brzina prenosa na dva hopa, tačnije ograničena je lošijim odnosom signal/šum na ulazu u dvije prijemne stanice.

Relacije (3.8) – (3.10) pokazuju da maksimalne brzine prenosa podataka zavise od vrijednosti *PER*-a. U razmatranom relejnom sistemu paket će biti dekodiran sa greškom na krajnjoj stanici, ako dođe do greške na prijemu na prvom hopu (kada je vjerovatnoća greške po paketu PER_1), ili ako se na prvom hopu paket ispravno prenese, a greška nastane prilikom transmisije na drugom hopu (pri vjerovatnoći greške PER_2). Tada se ukupna vjerovatnoća greške po paketu za komunikaciju između krajnjih stanica, za razmatrani relejni sistem, može prikazati kao:

$$PER_{DF} = PER_1 + PER_2(1 - PER_1) = PER_1 + PER_2 - PER_1PER_2 \quad (3.12)$$

S obzirom na to da je realno pretpostaviti da je *PER* vrijednost na svakom od hopova značajno manja od 1, uticaj vrijednosti PER_1PER_2 na ukupnu *PER* vrijednost je zanemarljiv, pa se (3.12) može aproksimirati sa:

$$PER_{DF} \approx PER_1 + PER_2 \quad (3.13)$$

U daljoj analizi pretpostavka je da su *PER* vrijednosti na svakom od hopova jednake, tj. $PER_{DF}=0.1$, $PER_1=PER_2=0.05$.

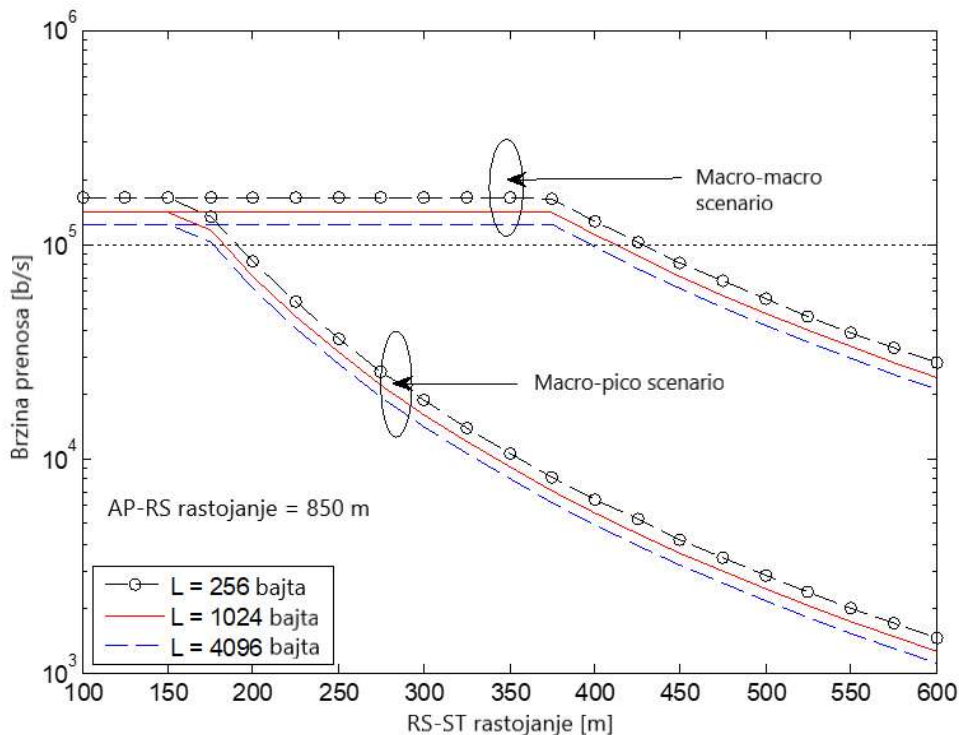
Slika 3.8 prikazuje grafik maksimalno ostvarivih brzina prenosa za DL komunikaciju u IEEE 802.11ah *dual-hop* DF relejnim sistemima za različite veličine paketa, podrazumijevajući da je predajna snaga AP i RS $P_{tx}=10$ mW. I ovdje je pretpostavka da je AP-RS kanal pod uticajem Rajsovog fedinga i *macro* propagacionih efekata, pa je podrazumijevano rastojanje između AP i RS 850 m. Ostali značajni parametri su: MCS0

modulaciona i koding šema, širina kanala $B=1$ MHz i $P_{out-toi}=P_{DF}=0.1$.

Paketi manje veličine i za lošiji odnos signal/šum na prijemu mogu da ispune zahtjev za BER, čime obezbjeđuju veće brzine prenosa podataka [vidjeti (3.8)]. Manji paketi, veličine $L=256$ bajta, mogu se koristiti u različitim IoT i M2M aplikacijama.

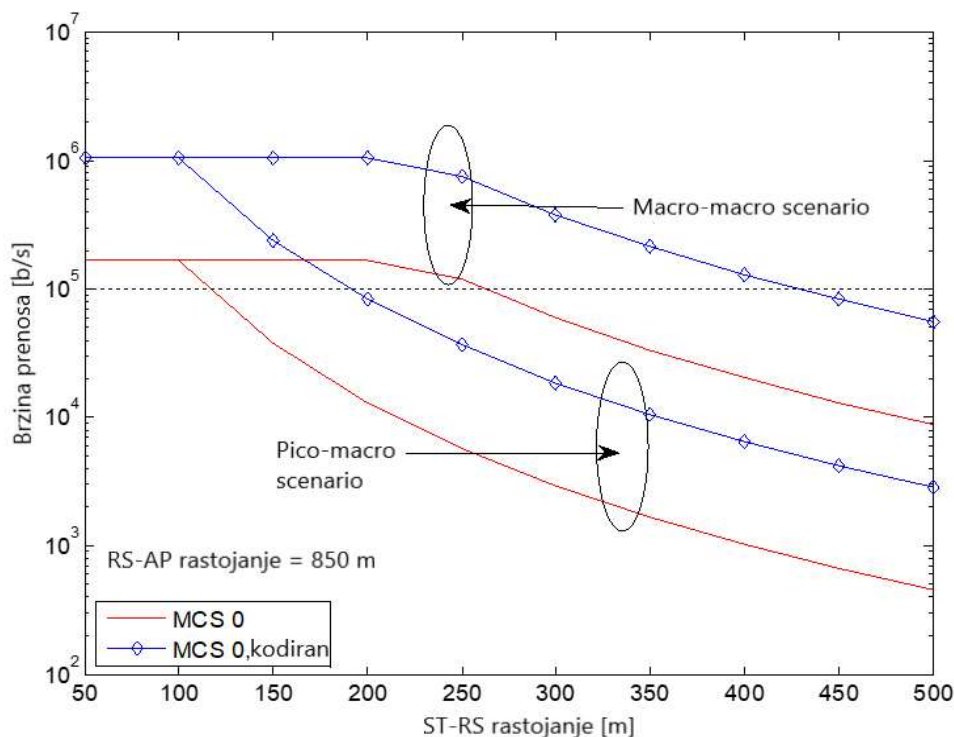
Sa slike 3.8 može se zaključiti da je željeni protok od 10^5 b/s ostvaren za rastojanja između RS i ST koja su veća od 420 m, prilikom *macro* modela prostiranja i prenosu pakete veličine $L=256$ bajta. U slučaju *pico* modela propagacije zahtijevana vrijednost brzine prenosa podataka je ostvarena za rastojanja do oko 190 m. Ovo znači da je, i u slučaju *pico* efekata propagacije na RS-ST linku, zahtjev za minimalni protok od 10^5 b/s ispunjen za ciljane domete od 1 km, uzimajući da je AP-RS rastojanje 850 m.

Prilikom razmatranja UL komunikacije, rezultati prikazani na slici 3.9 pokazuju da je za nekodirane MCS0 šeme i veličinu paketa $L=256$ bajta zahtjev po pitanju brzine prenosa podataka ispunjen za domete do 120 m i 270 m na prvom hopu (ST-RS link), za *pico* i *macro* modele komunikacije, respektivno. Uzimajući u obzir da je RS-AP rastojanje 850 m (a može biti i povećano za minimalni protok od 10^5 b/s), može se zaključiti da je i u slučaju *uplink* komunikacije, zahtijevana brzina prenosa podataka ostvariva na rastojanjima od 1 km između krajnjih stanica.



Slika 3.8. Ostvarive DL brzine prenosa podataka za MCS0 u IEEE 802.11ah relejnim sistemima

Ova komunikaciona rastojanja mogu biti značajno povećana kodiranjem, tj. primjenom MCS0 kodirane šeme. Tako na primjer, LDPC (*Low Density Parity Check*) šema kodiranja ima aproksimativno 8 dB kodni dobitak za BPSK modulaciju i kodni odnos 1/2, što znači da je moguće imati 8 dB lošiji odnos signal/šum na prijemu, za istu PER vrijednost po linku [21]. Ovo su parametri koji su korišćeni prilikom dobijanja rezultata prikazanih na slici 3.9. Svi ostali relevantni parametri su isti kao u prethodnom scenariju.



Slika 3.9. Ostvarive UL brzine prenosa podataka za MCS0 u IEEE 802.11ah relejnim sistemima

Prikazani rezultati za ostvarive brzine prenosa podataka u IEEE 802.11ah sistemima, za MCS0 i $B=1$ MHz, pokazuju da je postavljanjem releja na pažljivo izabranom rastojanju od pristupne tačke AP željena brzina prenosa od 10^5 b/s ostvariva za AP-ST rastojanja do 1 km, i za DL i UL komunikaciju. To znači da, kad god je snaga signala na prijemu veća od MDS nivoa u IEEE 802.11ah sistemima, komunikacija između AP i ST, uspostavljena preko RS, ostvarivaće zahtijevanu brzinu prenosa od 10^5 b/s. Takođe je pokazano da primjenom tehnika kodiranja, slanjem paketa manje veličine i povećanjem pretpostavljene vjerovatnoće ispada linka, ostvarivi dometi mogu biti još povećani, obezbjeđujući i dalje zahtijevane brzine prenosa podataka.

Glava 4

Analiza BER performansi IEEE 802.11ah sistema

Analiza uticaja srednjeg slabljenja i efekata *multipath* fedinga na snagu signala u IEEE 802.11ah sistemima u *outdoor* uslovima, uzimajući u obzir zahtjeve najrobustnijih modulacionih i šema kodiranja po pitanju minimalne snage signala na prijemu, imalo je za cilj stvaranje što realnije slike o maksimalno ostvarivim dometima u IEEE 802.11ah sistemima. Pored toga, razmotreni su efekti uvođenja relejnih stanica, kao rješenja za povećanje dometa. U cilju sveobuhvatne analize IEEE 802.11ah standarda i spoznaje realnih mogućnosti ovog sistema, analiza performansi S1G Wi-Fi tehnologije je proširena ispitivanjem vjerovatnoće greške po bitu (BER), u scenarijima koji obezbjeđuju maksimalne domete. Analiza BER performansi nekodiranih IEEE 802.11ah sistema je vršena primjenom Matlab simulacionog modela, u okviru kojeg su korišćeni odgovarajući, standardom definisani, simulacioni parametri, kao i modeli komunikacionih kanala koji su primjenljivi u razmatranim scenarijima.

Prvo su analizirane BER performanse direktne (*single hop*), *downlink* i *uplink* komunikacije između AP i ST, uz razmatranje slučajeva bez, i sa uticajem *multipath* fedinga. S obzirom na svrsishodnost implementacije releja u cilju povećanja dometa u IEEE 802.11ah sistemima, od značaja je i ispitivanje BER rezultata za *dual-hop* IEEE 802.11ah „dekodiraj-i-prosljedi“ relejne sisteme, koji su dobijeni primjenom Monte Carlo simulacije.

Kako je fokus istraživanja na maksimalno ostvarivim dometima IEEE 802.11ah sistema u Evropi, simulacije su uključivale parametre sistema definisane za Evropu i primjenu najrobustnijih nekodiranih MCS0 i MCS10 šema, što praktično znači da se BER računa za BPSK modulisane OFDM sisteme, širine kanala od 1 MHz, koji koriste 24 podnosioca

podataka razdvojenih za 31.25 KHz. Posebno je interesantan uticaj MCS10 šeme na BER performanse u IEEE 802.11ah sistemima, s obzirom na to da je ta modulaciona i šema kodiranja uvedena sa ciljem povećanja dometa i pouzdanosti sistema. Konkretno, u okviru četvrte Glave analizirani su simulacioni rezultati BER performanse u slučaju:

- direktne *downlink* komunikacije u IEEE 802.11ah sistemima uzimajući u obzir uticaj srednjeg slabljenja uslijed propagacije i *multipath* fading efekata;
- direktne *uplink* komunikacije u IEEE 802.11ah sistemima uzimajući u obzir uticaj srednjeg slabljenja uslijed propagacije i *multipath* fading efekata;
- *dual-hop downlink* komunikacije u IEEE 802.11ah relejnim sistemima uzimajući u obzir uticaj srednjeg slabljenja uslijed propagacije i *multipath* fading efekata;
- *dual-hop uplink* komunikacije u IEEE 802.11ah relejnim sistemima uzimajući u obzir uticaj srednjeg slabljenja uslijed propagacije i *multipath* fading efekata.

4.1 BER performanse pri direktnoj komunikaciji

Kao i u slučaju analize maksimalno ostvarivih dometa, i analiza BER performansi počće analizom rezultata dobijenih simulacijom direktne, *single hop*, komunikacije između pristupne tačke (AP) i krajnje stanice (ST) u nekodiranim IEEE 802.11ah sistemima. Razmatran je uticaj srednjeg slabljenja signala uslijed prostiranja na BER performanse, kao i kombinovani uticaj srednjeg slabljenja i *multipath* fadinga. Modelovani su i analizirani *macro* i *pico* modeli prostiranja signala. S obzirom na već identifikovana ograničenja ostvarivih dometa za *downlink* komunikaciju u Evropi, i generalno ograničenje *uplink* komunikacije u IEEE 802.11ah sistemima, analizirane su BER performanse tih komunikacionih scenarija na graničnim rastojanjima.

4.1.1 Parametri simulacije

Simulacioni model za analizu BER performansi nekodiranog IEEE 802.11ah sistema u slučaju direktne DL i UL komunikacije prilagođen je uslovima definisanim za Evropu, pa je predajna snaga AP, $P_{tx}=10$ mW (10 dBm), a predajna snaga ST je 1 mW (0 dBm). Na prijemu je modelovan aditivni bijeli Gausov šum (AWGN - *Additive White Gaussian Noise*), snage -

145.22 dB, a faktor šuma prijemnika (NF - *Noise Figure*) je 5 dB u slučaju *downlink* komunikacije, odnosno NF=3 dB na AP za *uplink* komunikaciju. Dobitak antene pristupne tačke je 3 dBi, dok je dobitak antena krajnje stanice 0 dBi.

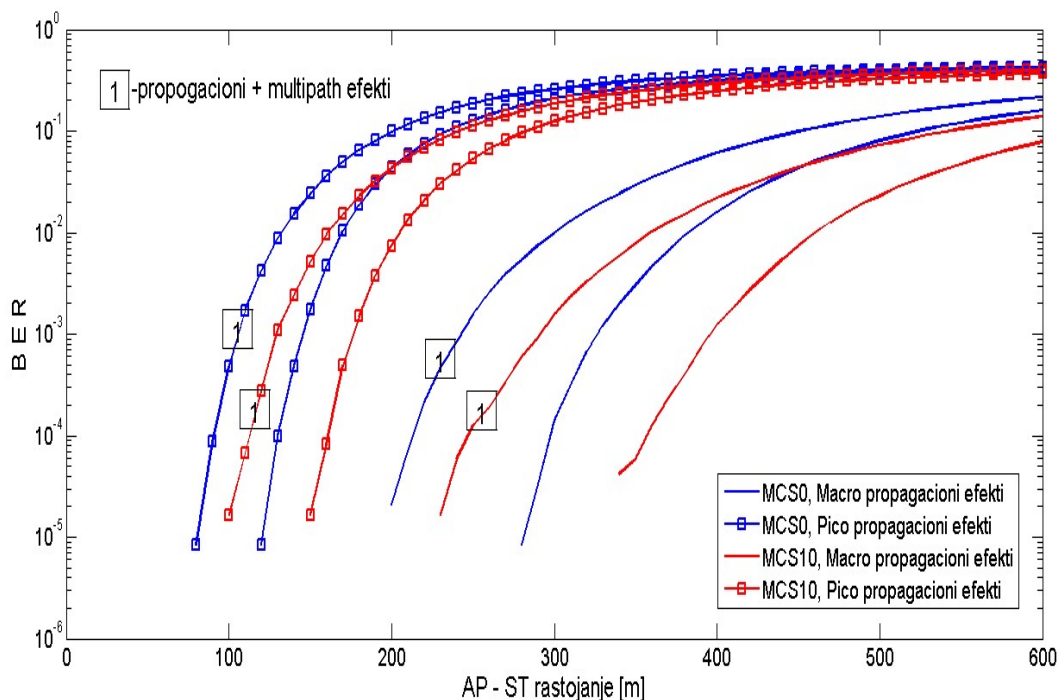
Uticao srednjeg slabljenja signala uslijed propagacije na BER performanse modelovan je uzimajući u obzir oba modela propagacije signala, *macro* i *pico*. U simulacijama koje uključuju uticaj *multipath* fedinga sa Rejljevom statistikom primijenjuje se *Typical Urban* PDP, u cilju modelovanja *multipath* efekata pri SISO komunikaciji u IEEE 802.11ah sistemima [29]. *Doppler*-ov pomjeraj je 0 Hz za svaki od razmatranih scenarija. U ovim analizama pretpostavka je da ST, u slučaju *downlink* komunikacije, odnosno AP, u slučaju *uplink* komunikacije, perfektno poznaju karakteristike komunikacionog kanala, pa simulacioni model ne podrazumijeva estimaciju kanala.

Simulacija je uključivala najrobustnije modulacione šeme, koje podrazumijevaju širinu kanala od 1 MHz (MCS10 i MCS0). U slučaju MCS10 primjenjuje se kodiranje OFDM simbola ponavljanjem (*repetition coding*) u vremenskom domenu, što znači da se dva ista OFDM simbola šalju u dva uzastopna vremenska intervala i da se na prijemu ta dva simbola kombinuju, nakon procesa ekvalizacije kanala.

4.1.2 Rezultati

Grafički prikaz BER rezultata za simuliranu *downlink* direktnu komunikaciju u evropskim IEEE 802.11ah sistemima, u zavisnosti od rastojanja između AP i ST, je dat na slici 4.1. Kao što je i očekivano, *multipath* feding i *pico* modelovanje uslova propagacije značajno pogoršavaju BER performanse sistema, dok primjena MCS10 i kodiranje simbola ponavljanjem pozitivno utiču na performanse, tj. smanjuju broj pogrešno rekonstruisanih bita. Analizom rezultata sa slike 4.1 i upoređivanjem sa maksimalno ostvarivim dometima u istim simuliranim scenarijima komunikacije (slika 3.1), mogu se donijeti zaključci o očekivanim BER vrijednostima na graničnim AP-ST rastojanjima. U slučaju *downlink* komunikacije, kada se uzme u obzir samo srednje slabljenje signala uslijed propagacije, ostvarivi dometi za MCS10 su oko 550 m i 260 m, za *macro* i *pico* modele, respektivno, dok su očekivane BER vrijednosti na tim AP-ST rastojanjima 5×10^{-2} i 7×10^{-2} , respektivno. Ako se koristi MCS0 modulaciona i koding šema, dometi su 490 m (*macro* model) i 210 m (*pico* model), a odgovarajuće BER vrijednosti 7×10^{-2} i 2×10^{-2} , respektivno. Kada se pored srednjeg slabljenja uslijed propagacije uzme u obzir i uticaj *multipath* efekata, modelovanjem kanala sa Rejljevom feding statistikom

i *Typical Urban* profilom, maksimalni dometi dobijeni simulacijom za MCS10 su 500 m i 220 m za *macro* i *pico* modele, respektivno (slika 3.3), a korenspodirajuće BER vrijednosti su 7×10^{-2} i 6×10^{-2} , respektivno. Kada se umjesto MCS10 primjenjuje MCS0, ostvarivi dometi u razmatranom *multipath* scenariju su 430 m (*macro* model) i 190 m (*pico* model), a BER vrijednosti na tim rastojanjima su 8×10^{-2} i 9×10^{-2} , respektivno.

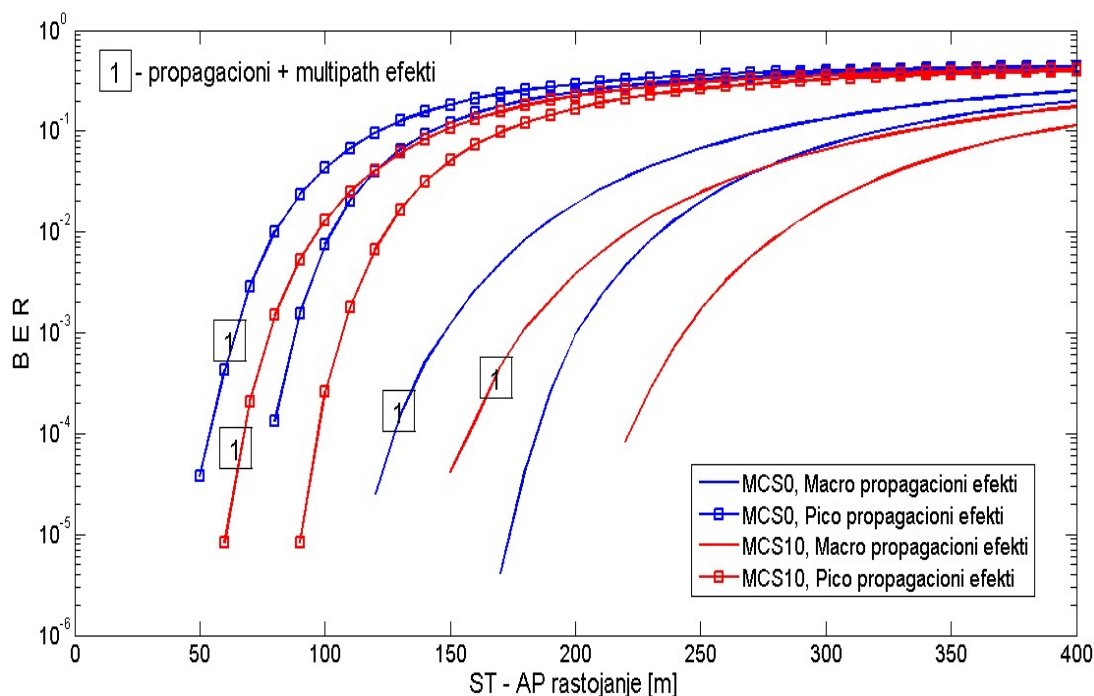


Slika 4.1. BER performanse *downlink* komunikacije u IEEE 802.11ah sistemima, kada je modelovan i uticaj fedinga

BER performanse različitih scenarija simulirane *uplink* direktne komunikacije u IEEE 802.11ah sistemima, prikazane su na slici 4.2. Rezultati potvrđuju prirodu uticaja *multipath* efekata, modela propagacije i modulacionih šema na BER performanse.

Upoređujući rezultate sa slike 4.2 i ranije analizirane maksimalno ostvarive domete, za iste razmatrane scenarije *uplink* komunikacije (slike 3.1 i 3.3), može se zaključiti kakve BER performanse IEEE 802.11ah sistema treba očekivati u scenarijima koji obezbjeđuju maksimalne domete. Za *uplink* komunikaciju, kada je modelovan samo uticaj srednjeg slabljenja signala uslijed propagacije, MCS10 šema omogućava domete do 300 m i 140 m, za *macro* i *pico* modele respektivno (slika 3.1), pa su očekivane BER vrijednosti na tim AP-ST rastojanjima 2×10^{-2} (*macro* model) i 3×10^{-2} (*pico* model). Primjenom MCS0 šeme u istom scenariju, dometi su 260 m za *macro* model i 110 m za *pico* model propagacije, a očekivane

BER vrijednosti na tim rastojanjima 3×10^{-2} i 2×10^{-2} , respektivno. Kada simulacija dodatno uključuje uticaj Rejljevog *multipath* fedinga, modelovanog primjenom *Typical Urban* profila, maksimalni dometi na *uplink*-u za MCS10 su 280 m i 120 m za *macro* i *pico* modele, respektivno (slika 3.3), i odgovarajuće vrijednosti vjerovatnoće greške po bitu su 5×10^{-2} i 4×10^{-2} , respektivno. Uzimajući u obzir isti model *uplink* komunikacionog kanala za signal modulisan MCS0 parametrima, ostvarivi dometi su 220 m (*macro* model) i 100 m (*pico* model), a BER vrijednosti na tim rastojanjima su 3×10^{-2} i 4×10^{-2} , respektivno.



Slika 4.2. BER performansi *uplink* komunikacije u IEEE 802.11ah sistemima uključujući propagacione i feding efekte

Analiza BER rezultata modelovane *downlink* i *uplink* direktne komunikacije u nekodiranim IEEE 802.11ah sistemima, pokazuje da su očekivane BER vrijednosti na granicama ostvarivih dometa reda 10^{-2} i da se povećanjem AP-ST rastojanja povećava i broj pogrešno primljenih bita. Rezultati potvrđuju opravdanost uvođenja MCS10 u cilju povećanja pouzdanosti sistema, ali i pored toga BER rezultati *downlink* (evropski parametri) i *uplink* komunikacije pokazuju ograničenja u ostvarivanju željenjih performansi IEEE 802.11ah sistema.

4.2 BER performanse relejnih sistema

Analize ostvarivih dometa i brzina prenosa u IEEE 802.11ah sistemima pokazale su očigledne benefite koje za poboljšanje tih performansi ostvaruje implementacija relejne stanice, posebno u scenarijima koji su prepoznati kao najkritičniji za obezbjeđivanje željenih dometa (*uplink* komunikacija i ograničene predajne snage na *downlink*-u). Stoga, jasno je da *dual hop* IEEE 802.11ah DF relejni sistemi imaju potencijal za ispunjavanje inicijalnih zahtjeva i širu primjenu, pa su u nastavku analizirani simulacioni rezultati BER karakteristika takvog sistema. Simulirani su scenariji *downlink* i *uplink* komunikacije uzimajući u obzir uticaj srednjeg slabljenja i *multipath* fedinga na BER performanse.

4.2.1 Parametri simulacije

U Matlabu su modelovani DL i UL komunikacioni procesi nekodiranih *dual hop* IEEE 802.11ah “dekodiraj-i-proslijedi” (DF) relejnih sistema, primjenjujući vrijednosti parametara koji su definisani evropskom regulativom. To podrazumijeva da predajna snaga AP i RS bude $P_{tx}=10$ mW (10 dBm), dok IEEE 802.11ah stanica u slučaju *uplink* komunikacije emituje snagom od 1 mW (0 dBm).

Rajsov feding kanal sa K faktorom od 9 dB je modelovan na AP-RS linku, dok se srednje slabljenje uslijed propagacije na ovom linku računa po *macro* modelu, i u slučaju DL i UL komunikacije. Podrazumijeva se da je RS-ST link pod uticajem fedinga sa Rejljevom statistikom i na RS-ST linku analiziran je uticaj oba modela srednjeg slabljenja (*macro* i *pico*) na komunikacioni proces. Na oba hopa se primjenjuje *Typical Urban* PDP prilikom modelovanja *multipath* efekata. Za relejnu stanicu na fiksnoj poziciji i statičnu krajnju stanicu (ST), *Doppler*-ov pomjeraj je jednak 0 Hz za svaki od razmatranih scenarija. Bijeli Gausov šum (AWGN) snage -145.22 dB je podrazumijevan na svakoj prijemnoj stanici. Faktor šuma na AP i RS je 3 dB, dok je na krajnjoj stanici 5 dB. Dobici antena pristupne tačke i relejne stanice su 3 dBi, a dobitak antena na krajnjoj stanici je 0 dBi.

U ovim analizama pretpostavka je da RS i AP u slučaju UL-a, ili RS i ST u slučaju DL komunikacije, perfektno poznaju karakteristike odgovarajućih komunikacionih kanala, pa simulacioni model nije uključivao procjenu komunikacionih kanala.

Ova analiza uključuje poređenje dobijenih BER rezultata za MCS0 i MCS10, pa su simulirana oba tipa modulacionih šema. U slučaju MCS10 kodiranje se vrši ponavljanjem OFDM simbola (*repetition coding*) u vremenskom domenu.

4.2.2 Rezultati

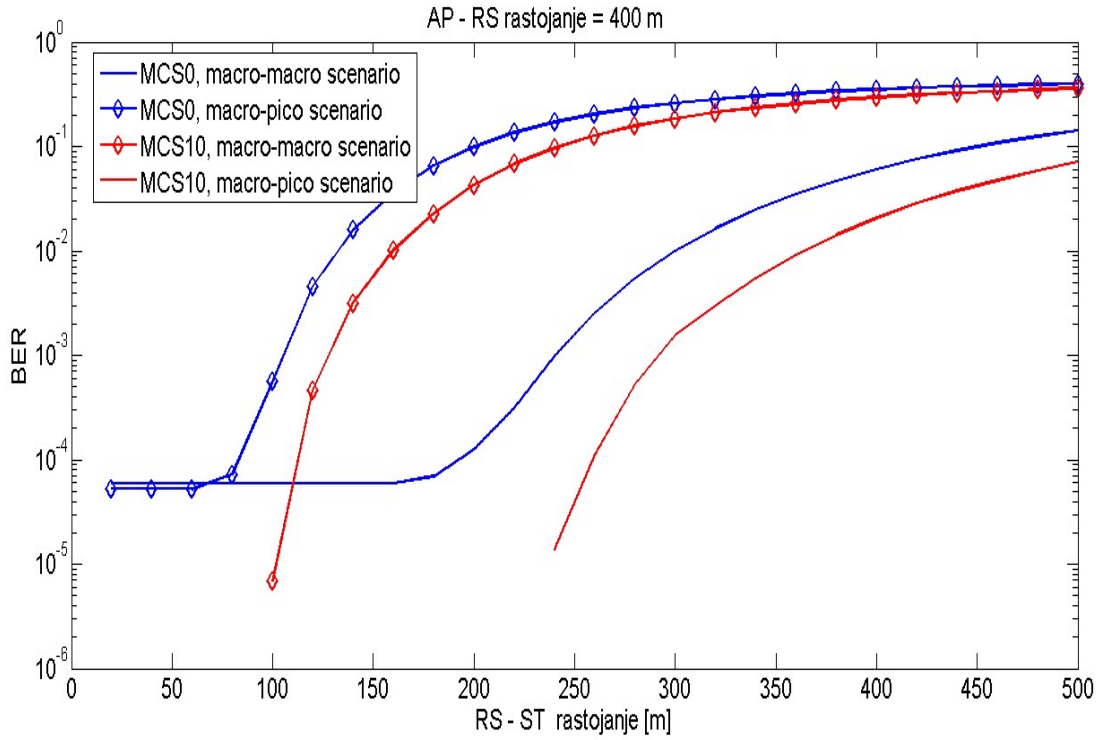
BER rezultati za DL komunikaciju u *dual hop* IEEE 802.11ah DF relejnom sistemu, prikazani u funkciji rastojanja između RS i ST, prezentovani su na slici 4.3, dok su BER rezultati u slučaju UL komunikacije, za isti razmatrani sistem, prikazani na slici 4.4.

Rezultati prikazani na slici 3.6, koji su dobijeni simulacijom IEEE 802.11ah sistema u *multipath* feding kanalu sa *Typical Urban* PDP (koji je modelovan i u BER analizi), pokazuju da su maksimalni dometi na *downlink*-u u IEEE 802.11ah relejnim sistemima, pri *macro-macro* modelovanju propagacije, oko 890 m (400 m AP-RS rastojanje + 490 m RS-ST rastojanje) i 810 m (400 + 410 m) za MCS10 i MCS0 modulacione šeme, respektivno. Sa slike 4.3 sada se mogu vidjeti očekivane vrijednosti BER-a za te maksimalno ostvarive domete u datim uslovima: u slučaju MCS10 pri rastojanju između RS i ST od 490 m očekivana vjerovatnoća greške po bitu je 6×10^{-2} , dok je za MCS0 na rastojanju od 410 m između RS i ST vrijednost BER 7×10^{-2} .

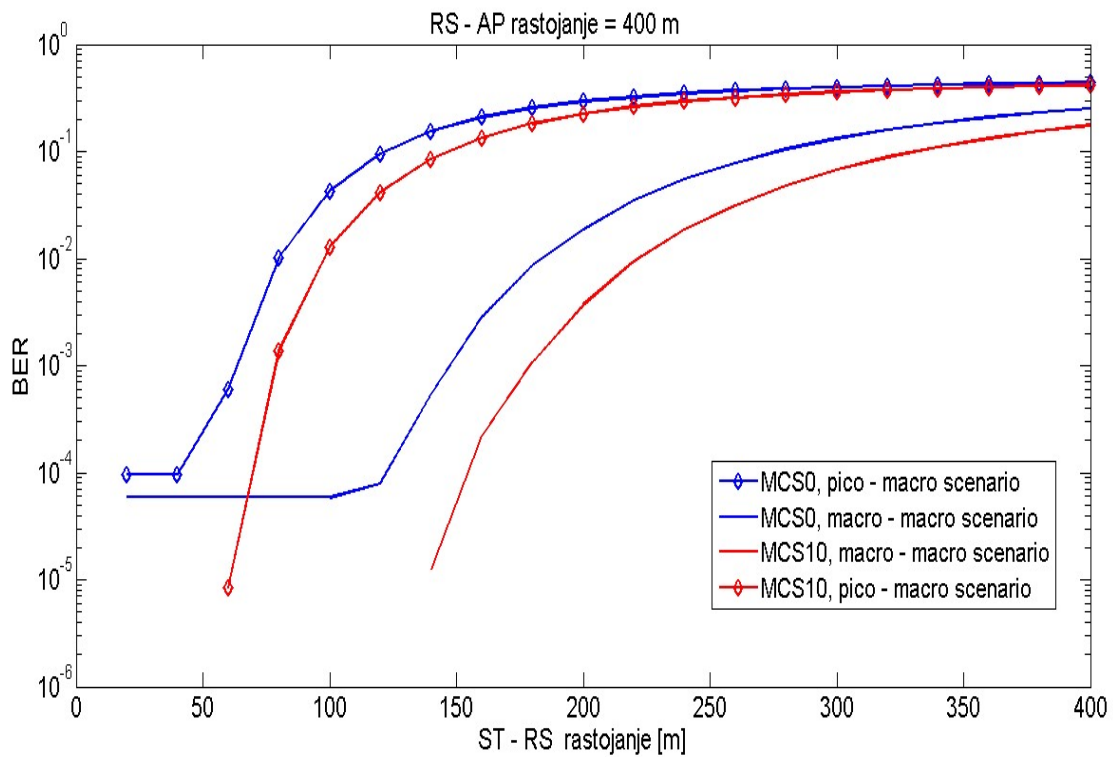
Kada se, pri istim uslovima, na DL komunikaciju primijeni *macro-pico* propagacioni scenario, dometi su značajno manji i iznose oko 630 m (400 + 230 m) i 580 m (400 + 180 m) (slika 3.6) za MCS10 i MCS0, respektivno. Odgovarajuće vrijednosti BER-a na granicama zona pokrivanja u tim slučajevima su 7×10^{-2} za MCS0 i 8×10^{-2} za MCS10.

Što se tiče UL komunikacije, rezultati simulacije su pokazali da su maskimalno ostvarivi dometi za slučaj *macro-macro* propagacionog scenarija u *dual hop* IEEE 802.11ah sistemima, u istim predviđenim *multipath* uslovima, oko 670 m (270 m ST-RS rastojanje + 400 m RS-AP fiksna distanca) i 630m (230 + 400 m) za MCS10 i MCS0, respektivno (slika 3.6). BER vrijednosti koje korensopdiraju tim maksimalnim distancama su 6×10^{-2} za MCS10 i 5×10^{-2} za MCS0 (Slika 4.4).

U slučaju *pico-macro* UL komunikacionog scenarija, vrijednost BER-a za maksimalno ostvarivi domet (MCS10) od 520 m je približno 3×10^{-2} , dok za drugi najveći domet od 500 m, primjenom MCS0, treba očekivati vrijednost BER-a od oko 4×10^{-2} .



Slika 4.3 DL BER performanse IEEE 802.11ah relejnih sistema



Slika 4.4 UL BER performanse IEEE 802.11ah relejnog sistema

Potvrđuje se da je pažljivo biranje optimalne pozicije pristupne i relejne stanice od velikog značaja i za BER performanse, kao i za ostvarive domete u IEEE 802.11ah sistemima. Tačnije, analize su pokazale da su BER rezultati u *macro* scenarijima propagacije mnogo bolji, nego odgovarajući rezultati primjenom *pico* modela.

Prezentovani BER rezultati za sve simulirane scenarije komunikacije (slike 4.1, 4.2, 4.3 i 4.4) potvrđuju da kodiranje ponavljanjem u vremenskom domenu (*repetition coding*), implementirano u okviru MCS10, donosi značajne benefite IEEE 802.11ah sistemima, u smislu unapređenja BER performansi. Tako npr., sa slike 4.3 se vidi da u slučaju DL komunikacije i *macro-macro* prostiranja signala, na rastojanju od 350 m između RS i ST, primjenom MCS10, vrijednost BER je 7×10^{-3} , dok kada se primijeni tehnika bez ponavljanja simbola u vremenskom domenu ili MCS0 modulaciona i koding šema, BER vrijednost na istom rastojanju je 3×10^{-2} . Kada posmatramo rezultate DH UL komunikaciju (slika 4.4), za iste modele propagacije, na istim rastojanju ST-RS od 200 m, MCS10 šema obezbjeđuje BER od 4×10^{-3} , dok je za MCS0 očekivana BER vrijednost 2×10^{-2} .

Glava 5

Analiza PER performansi IEEE 802.11ah sistema

Analiza vjerovatnoće greške po paketu (PER- *Packet Error Rate*) u radio kanalima pod uticajem fedinga, od praktičnog je značaja za evoluciju performansi radio sistema u pogledu pouzdanosti i kapaciteta. U okviru poglavlja 3.3 analitički su evaluirane ostvarive brzine prenosa podataka u IEEE 802.11ah sistemima, za maksimalno ostvarive domete, pod uticajem fedinga, podrazumijevajući vjerovatnoću greške po paketu od 10%. Kako bi se stekla realna slika o PER karakteristikama i očekivanim vrijednostima u IEEE 802.11ah sistemima, analitičkim putem je razmatran PER za različite, standardom definisane, scenarije primjene IEEE 802.11ah sistema (poglavlje 2.2). Različiti scenariji primjene impliciraju različite efekte propagacije i feding uslove i zahtijevaju različite performanse komunikacionog sistema, na osnovu kojih je potrebno izabrati odgovarajuće parametre sistema na fizičkom nivou.

U zavisnosti od tipa *multipath* fedinga, koji utiče na komunikaciju na radio kanalu, treba primijeniti adekvatan model za računanje vjerovatnoće greške po paketu. U kanalima sa brzim fedingom, feding efekti različito utiču na pojedinačne simbole koji se prenose u okviru istog paketa. U slučaju takvog tipa fedinga, nazvanog i ergodični (*ergodic*) feding, srednja vjerovatnoća greške po paketu, \overline{PER} , definisana kao ergodični PER, se računa na osnovu srednje vrijednosti vjerovatnoće greške po simbolu, \overline{SER} (*Simbol Error Rate*),

$$\overline{PER}(\bar{\gamma}) = 1 - (1 - \overline{SER}(\bar{\gamma}))^N \quad (5.1)$$

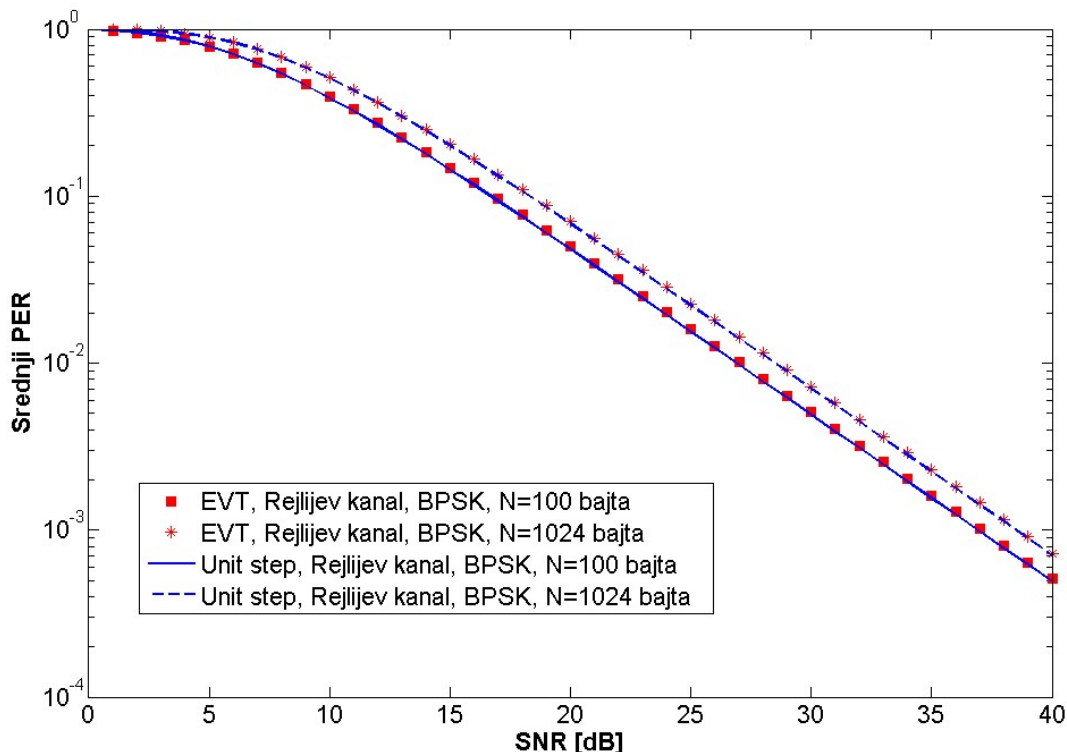
uzimajući da je N broj simbola po paketu, da je $\bar{\gamma}$ srednja vrijednost odnosa signal/šum na prijemu (izražena u dB), a \overline{SER} srednja vjerovatnoća greške po simbolu, koja zavisi od modulacije koja se koristi [31].

Sa druge strane, kada je radio kanal pod uticajem *multipath* fedinga kojeg karakterišu spore promjene uslova pod kojim nastaje, tzv. blok (*block*) feding, pretpostavljajući da isto ili slično stanje fedinga utiče na više različitih simbola jednog paketa, relevantan parametar je PER po bloku. U takvim uslovima fedinga, srednja vjerovatnoća greške po paketu, \overline{PER} , se računa usrednjavanjem trenutne vrijednosti PER u kanalu sa bijelim Gausovim šumom, po svim mogućim vrijednostima prijemnog SNR-a (γ), za datu funkciju distribucije odnosa signal-šum (SNR), f_γ :

$$\overline{PER}(\bar{\gamma}) = \int_0^{\infty} PER(\gamma) f_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (5.2)$$

Kako bi se izveo proračun PER vrijednosti u sistemima po uticajem blok fedinga, razmatrano je nekoliko aproksimacija integrala (5.2), sa ciljem nalaženja forme koja će dati najbolju aproksimaciju srednje vrijednosti vjerovatnoće greške po paketu [31], [32]. U okviru [31] izučavana su dva metoda aproksimacije blokovskog \overline{PER} , Asimptotska aproksimacija i *Unit step* aproksimacija, dok je Teorija ekstremnih vrijednosti (EVT – *Extreme Value Theory*) korištena za aproksimaciju \overline{PER} u [32]. S obzirom na to da *Unit step* aproksimacija, za razliku od Asimptotske, omogućava validnu aproksimaciju u blok feding kanalima sa Rajsovom statistikom [31], a da *Unit Step* i EVT aproksimacije daju približno iste rezultate za srednji PER u nekodiranim, blok Rejljevskim kanalima (slika 5.1), za potrebe analitičke evaluacije PER performansi IEEE 802.11ah sistema, korišćena je *Unit Step* aproksimacija.

Unit step aproksimira srednje vrijednosti vjerovatnoće greške po paketu u najčešće razmatranim modelima kanala (*Rayleigh*, *Rician*, *Nakagami-m*), pod uticajem sporog ili blok fedinga. Ovaj matematički metod omogućava validnu aproksimaciju srednjih vrijednosti PER-a za Rajsove i Rejljeve nekodirane, blok feding kanale, koji se razmatraju u ovoj analizi i koji adekvatno modeluju uslove u kojima se odvija komunikacija u specifičnim scenarijima primjene definisanim za IEEE 802.11ah sisteme. *Unit step* aproksimacija daje preciznije rezultate kada paketi sadrže veći broj simbola, a pokazala se i kao praktično efikasna aproksimacija za kodirane sisteme [31].



Slika 5.1. *Unit step* i EVT aproksimacije srednjeg PER-a na kanalu sa Rejljevom fadingom, za BPSK modulaciju

Na osnovu *Unit step* metode, srednja vrijednost vjerovatnoće greške po paketu, \overline{PER} , u Rejljevom blok fading kanalu, se približno aproksimira izrazom zatvorene forme:

$$\overline{PER} = 1 - \exp(-\gamma_{th}/\bar{\gamma}) \quad (5.3)$$

gdje je $\bar{\gamma}$ srednja vrijednost SNR-a na prijemu, a γ_{th} je granična vrijednost SNR-a, ispod koje je *unit step* funkcija jednaka 1, a iznad koje funkcija ima vrijednost 0.

Primjenjujući isti metod, dobijen je izraz u zatvorenoj formi kojim se aproksimira srednji PER za radio sistem u Rajsovom blok fading kanalu:

$$\overline{PER} = 1 - Q_1 \left(\sqrt{2K}, \sqrt{2(K+1) \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}} \right) \quad (5.4)$$

gdje je Q_1 Marcum Q funkcija definisana u [33], a K je Rajsov fading faktor.

Za nekodirane modulacione sisteme, granična vrijednost SNR-a, γ_{th} , neophodna za računanje *Unit step* aproksimacije srednje vrijednosti PER-a, se može izvesti iz, [31]:

$$(1 - SER(\gamma_{th}))^N = 1/2, \quad (5.5)$$

podrazumijevajući da paket sadrži N simbola, a da je SER vjerovatnoća greške po simbolu za odgovarajuću modulaciju.

Vjerovatnoća greške po simbolu za odgovarajuću modulaciju se može računati na osnovu jednačina (5.6) i (5.7). Za koherentne modulacione šeme, kao što su M-ASK (*M – Amplitude Shift Keying*), M-PAM (*M - Pulse Amplitude Modulation*), MSK (*Minimum Shift Keying*), M-PSK (*M – Pulse Shift Keying*) i M-QAM, vjerovatnoća greške po simbolu se računa prema (5.6), gdje je $Q(\cdot)$ Gausova Q funkcija, a c_m i k_m su karakteristični parametri za posmatranu modulaciju. Kada se razmatraju nekoherentne modulacione šeme, FSK (*Frequency Shift Keying*) i DPSK (*Diferential Pulse Shift Keying*), SER se računa primjenom (5.7).

$$SER(\gamma) = c_m Q(\sqrt{k_m \gamma}) \quad (5.6)$$

$$SER(\gamma) = c_m e^{-k_m \gamma} \quad (5.7)$$

U Tabeli 2.1 prikazane su modulacione šeme koje se koriste u IEEE 802.11ah sistemima. Kako se radi o koherentnim M-PSK i M-QAM modulacijama, vjerovatnoća greške po simbolu se računa na osnovu jednačine (5.6) i primjenom adekvatnih parametara, c_m i k_m . Računanje SER je neophodno za proračun srednjeg PER-a u kanalu sa ergodičnim fadingom, kao i za aproksimaciju srednjeg PER-a u blok fading kanalima, primjenom *Unit step* metode.

5.1 PER performanse u različitim scenarijima primjene

U okviru poglavlja 2.1 opisani su različiti scenariji primjene, koje je TGah definisala tokom procesa standardizacije kao komunikacione scenarije u kojima je opravdano koristiti fleksibilnost i potencijal IEEE 802.11ah sistema. Različiti scenariji primjene podrazumijevaju

različite okolnosti i uslove propagacije (okruženje, mobilnost, tip fedinga i dr.), kao i različite zahtjeve po pitanju željenih performansi sistema (brzina prenosa podataka, ostvarivi domet, pouzdanost idr.) koji se mogu ostvariti primjenom odgovarajućih parametara sistema (predajna snaga, modulaciona šema, veličina paketa ...). Tabela 5.1 prikazuje okruženja, modulacione šeme, tip komunikacije i feding uslove koji su karakteristični sa svaki od razmatranih scenarija, i na osnovu kojih je potrebno izabrati adekvatne parametre i proračunati očekivane vrijednosti srednjeg PER-a.

Tabela 5.1 Podrazumijevani parametri za različite scenarije primjene

<i>Scenario</i>	<i>Okruženje</i>	<i>Modulaciona šema</i>	<i>Link</i>	<i>Feding kanal</i>
Senzori i brojila	Urbano Suburbano Ruralno	BPSK	AP- ST	Blok Rejli
Backhaul agregacija	Industrijsko Ruralno	16QAM 64QAM 256QAM	AP-AP	Blok Rajs
WLAN povećanog dometa i off-loading	Urbano Suburbano	16QAM 64QAM 256QAM	AP-ST	Ergodični Rejli

Sve analize su vršene pretpostavljajući tipične IEEE 802.11ah parametre (predajna snaga, dobitak antene, faktor šuma...), koji su prikazani u Tabeli 5.2 [11]. Kako IEEE 802.11ah sistemi rade u nelicenciranim frekvencijskim opsezima, neki od operativnih parametara se razlikuje od države do države, zavisno od važeće regulative. Kao što je predočeno u okviru poglavlja 2.2, predajna snaga u IEEE 802.11ah sistemima je ograničena na 10 mW u Evropi i Kini, dok su u Japanu i SAD dozvoljene predajne snage 250 mW i 1 W, respektivno. Sve tri vrijednosti predajne snage uzete su u obzir prilikom analize PER performansi IEEE 802.11ah komunikacije u senzorskim mrežama i za *backhaul* linkove, dok za potrebe povećanog WLAN dometa i celularni *off-loading*, jedino ima smisla razmatrati IEEE 802.11ah sisteme kada je predajna snaga 1 W. Prisustvo bijelog Gausovog šuma, snage od -145.22 dB, podrazumijeva se na svim prijemnim stanicama za pretpostavljenu širinu kanal od 1 MHz. Šeme za kodiranje nijesu uzete u obzir tokom analize, što znači da su svi PER rezultati dobijeni za nekodirane sisteme. Za scenarije primjene koji podrazumijevaju AP-ST komunikaciju, PER rezultati za *downlink* komunikaciju su računati uzimajući u obzir pogodnije uslove propagacije definisane *macro* modelom, što znači da se optimalnim planiranjem AP antena pozicionira na visini od

15m iznad srednje visine krovova u okruženju. U realnim scenarijima, komunikacija u senzorskim mrežama se vrlo često odvija u uslovima koji su sličniji onima koje definiše *pico* model prostiranja, pa će se PER performanse na *uplink*-u u senzorskim mrežama, kao najkritičnijem scenariju komunikacije, računati za *macro* i *pico* modele propagacije signala.

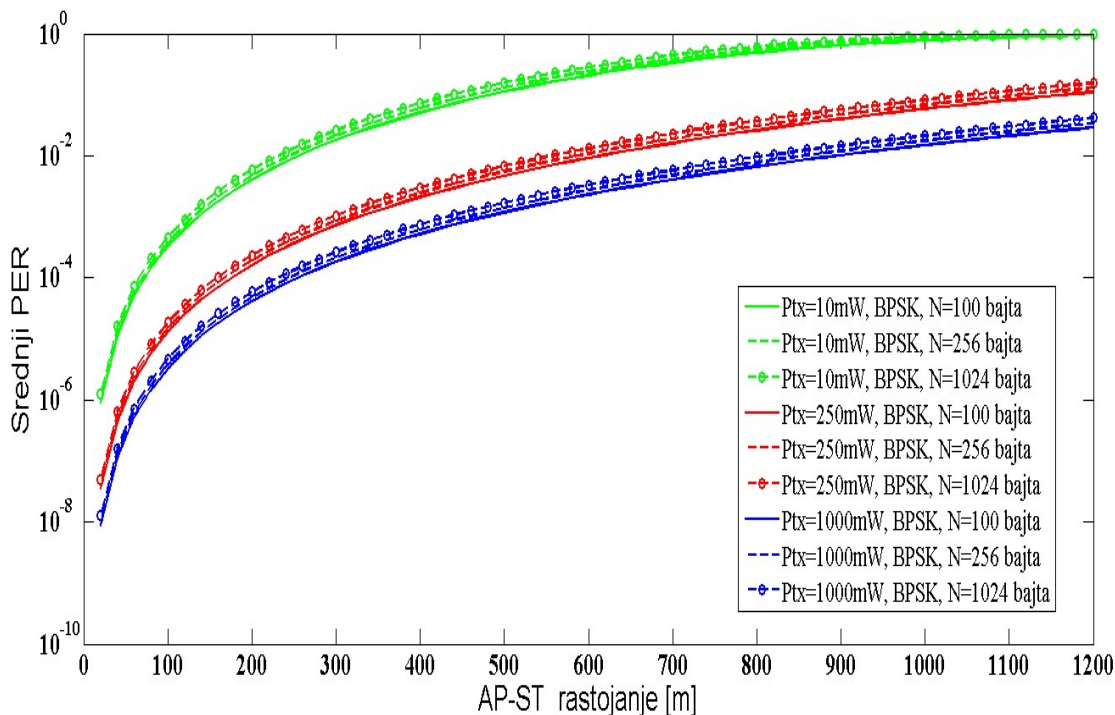
Tabela 5.2 IEEE 802.11ah tipični parametri

	<i>AP</i>	<i>ST</i>
Predajna snaga, P_{tx} (mW)	10, 250, 1000 (zavisno od države)	1
Faktor šuma NF (dB)	3	5
Dobitak antene (dBi)	3	0

5.1.1 Scenario primjene: senzori i pametna brojila

Primjenjujući jednačinu (5.3), koja predstavlja *Unit step* aproksimaciju srednje vrijednosti PER funkcije za Rejljev blok feding kanal, i uzimajući u obzir odgovarajuće parametre i komunikacione uslove, dobijene su srednje vrijednosti vjerovatnoće greške po paketu u odnosu na rastojanje AP-ST, u scenarijima u kojima se IEEE 802.11ah tehnologija primjenjuje za umrežavanje senzora i pametnih brojila. Ovaj scenario zahtijeva primjenu najrobustnijih modulacionih šema, MCS10 i MSC0, koje impliciraju BPSK mapiranje signala, u cilju obezbjeđivanja maksimalnih dometa i pouzdane komunikacije, kao prioriternih zahtjeva.

Slika 5.2 prikazuje \overline{PER} rezultate, za različite veličine paketa i različite predajne snage *downlink* komunikacije, u IEEE 802.11ah sistemima. Kao što je očekivano, sa povećanjem veličine paketa i smanjenjem predajne snage, \overline{PER} performanse se pogoršavaju. U okviru minimalnih zahtjeva po pitanju osjetljivosti prijemnika, u [34] je specificirano da PER vrijednost treba biti manja od 10^{-1} za pakete veličine 256 bajta. Rezultati sa slike 5.2 pokazuju da je taj zahtjev ispunjen za rastojanja kraća od 450 m, kada je predajna snaga 10 mW, dok u slučajevima kada su predajne snage veće (250 mW i 1 W) zahtjev je ispunjen za sva rastojanja do 1 km, što predstavlja inicijalni cilj za ostvarivi domet u WLAN mrežama zasnovanim na IEEE 802.11ah standardu.

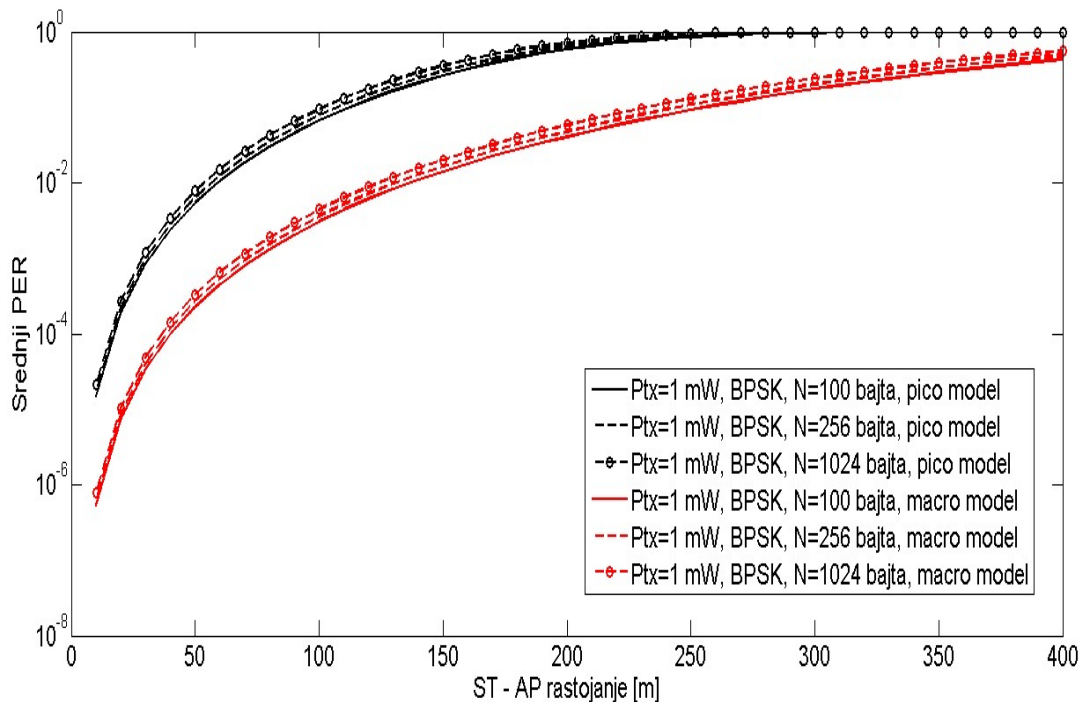


Slika 5.2. PER performanse IEEE 802.11ah sistema: senzori i pametna brojila, *downlink* komunikacija

Skromni energetska kapaciteta senzora i brojila, koji se uglavnom napajaju baterijama male autonomije, uzrokuju i vrlo skroman potencijal kada je u pitanju predajna snaga, čineći *uplink* komunikaciju posebnim izazovom prilikom ispunjavanja zahtjeva. Analiza performansi *uplink* komunikacije u IEEE 802.11ah sistemima pokazala je ograničenja u pogledu ostvarivih dometa i BER performansi, pa je za očekivati da će i PER rezultati biti lošiji od željenih, jer je definisana predajna snaga energetska ograničenih krajnjih stanica (u ovom scenariju senzora ili brojila) svega 1 mW. Pretpostavka je da se *uplink* komunikacija odvija pod uticajem Rejljevog blok fedniga, dok se srednje slabljenje modeluje *macro* i *pico* modelima propagacije. Razmatrane su različite veličine paketa koji se prenose, kao i u slučaju *downlink* komunikacije.

Rezultati na slici 5.3 prikazuju vrijednosti srednjeg PER-a za direktnu *uplink* komunikaciju, u zavisnosti od ST-AP rastojanja. Ako se posmatraju dobijeni rezultati za kritičniji *pico* model propagacije, može se zaključiti da je zahtjev da srednji PER ne bude veći od 10^{-1} ispunjen za rastojanja do 100 ili 110 m, zavisno od veličine paketa koji se prenose. Ako bi se pristupne tačke, senzori i brojila u mreži pozicionirali tako da odgovaraju *macro* uslovima propagacije, dometi, za koje bi bio ispunjen PER zahtjev, bi dostizali 230 m (za $N=1024$ bajta)

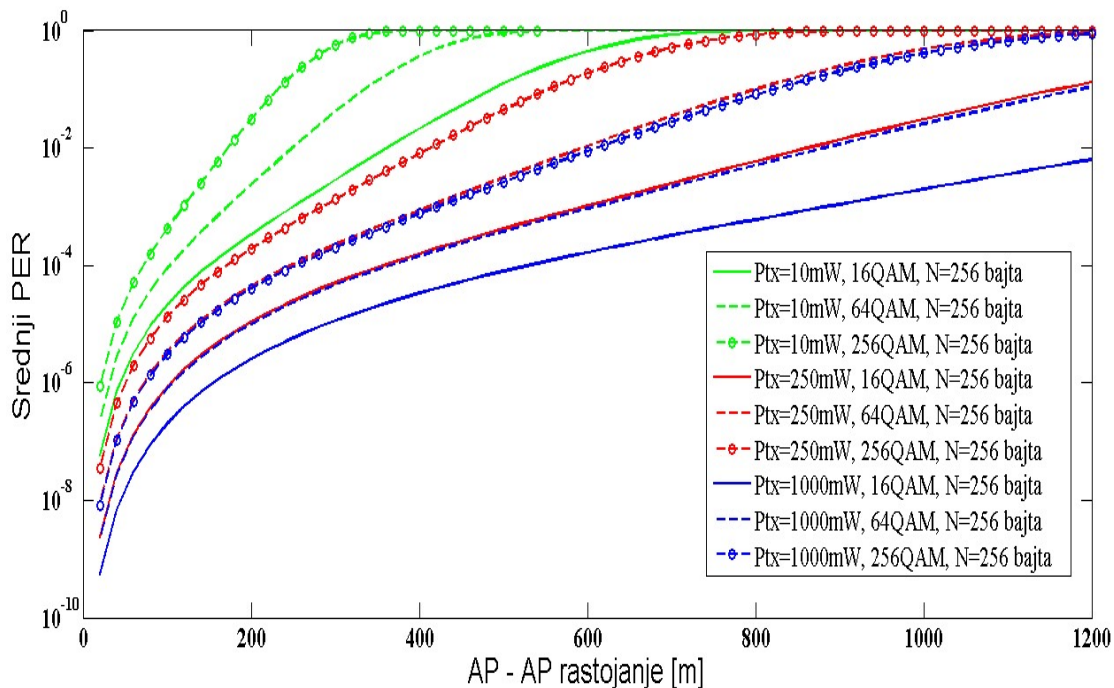
ili 250 m (za $N=100$ bajta). Primjena modulacija višeg reda i prenos većih paketa bi negativno uticali na već loše PER performanse *uplink* komunikacije.



Slika 5.3. PER performanse IEEE 802.11ah sistema: senzori i pametna brojlja, *uplink* komunikacija

5.1.2 Scenario primjene: *backhaul* agregacioni link

PER performanse IEEE 802.11ah sistema, sa parametrima prilagođenim primjeni u scenarijima *backhaul* agregacije i prenosa podataka između dva AP-a, prikazani su na slici 5.4. Rezultati su dobijeni pretpostavljajući komunikaciju pod uticajem Rajsovog blok fedinga i, shodno tome, primjenom jednačine (5.4), kojom se aproksimiraju srednje vrijednosti PER-a primjenom *Unit step* funkcije. Uzete su u obzir različite predajne snage i QAM modulacije višeg reda, kako bi se ispunili zahtjevi za većim brzinama prenosa podataka u poređenju sa sistemima prilagođenim prethodnom scenariju primjene. Izabrana je veličina paketa od 256 bajta.



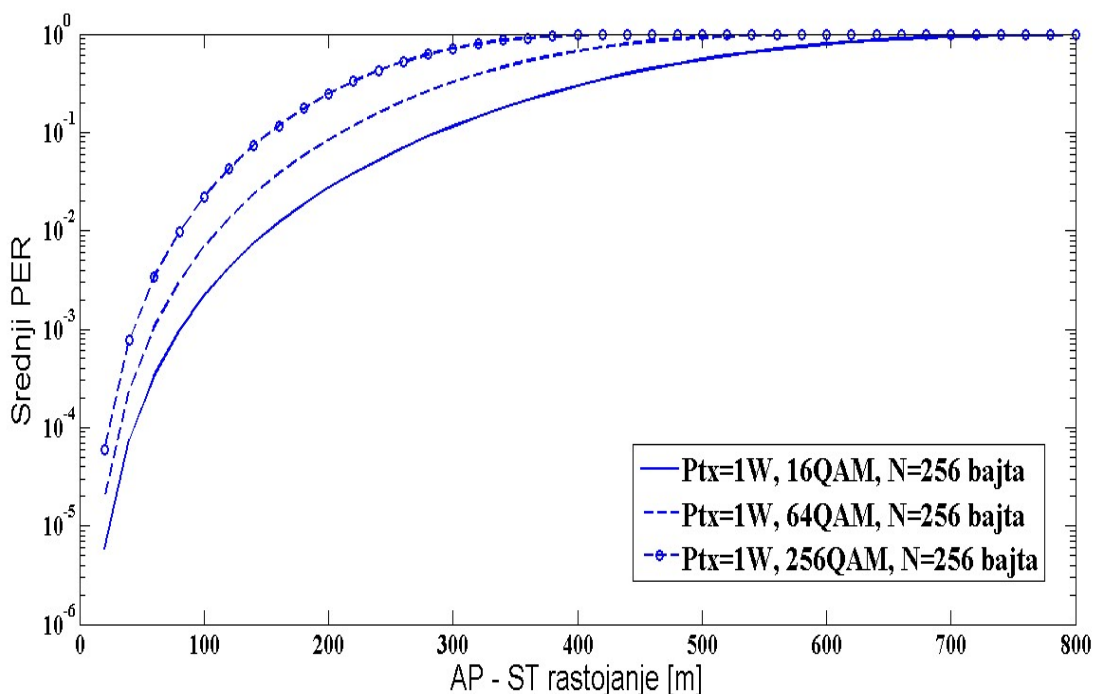
Slika 5.4. PER performanse IEEE 802.11ah sistema: *backhaul* agregacioni link

Rezultati pokazuju da sistemi definisani po evropskom standardu, sa maksimalnom dozvoljenom predajnom snagom od 10 mW, primjenjujući MCS višeg reda sa ciljem povećanja kapaciteta, nijesu adekvatno rješenja za ispunjenje zahtjeva ovog scenarija. Vrijednosti srednjeg PER-a su manje od 10^{-1} na rastojanjima do 230 m, 340 m i 500 m između dva AP-a, za primijenjene modulacije 256QAM, 64QAM i 16QAM, respektivno. Sistemi sa većim predajnim snagama (250 mW i 1 W) omogućavaju kreiranje pouzdanih linkova na rastojanjima od 600 m, pa do više od 1 km, zavisno od izabrane modulacije, tj. zahtjevanog protoka.

5.1.3 Scenario primjene: WLAN povećanog dometa i *Off-loading* saobraćaja

Na slici 5.5 prikazane su \overline{PER} izračunate vrijednosti za Rejljev ergodični fading kanal i modulacione šeme višeg nivoa, koje se koriste kada je fleksibilne IEEE 802.11ah sisteme potrebno prilagoditi scenarijima koji zahtijevaju veće brzine prenosa, kao što je slučaj sa povećanjem WLAN dometa i *off-loading* saobraćajem. Rezultati su dobijeni primjenom jednačine (5.1) i aproksimacijom srednje vjerovatnoće greške po simbolu, koja je data u [35]. Veličina paketa je 256 bajta. Istovremeni zahtjevi za povećanjem dometa (u odnosu na

tradicionalna Wi-Fi rješenja) i brzine prenosa podataka (u odnosu na druge tehnologije velikih dometa), kao i feding uslovi pod kojim se odvija komunikacija u ovim scenarijima primjene, uzrokuju da jedino kada je $P_{tx}=1$ W primjena IEEE 802.11ah standarda u ove svrhe ima smisla. To znači da je jedino u SAD moguće implementirati IEEE 802.11ah sisteme za ove namjene.



Slika 5.5 PER performanse IEEE 802.11ah sistema: WLAN povećanog dometa i *off-loading* scenario

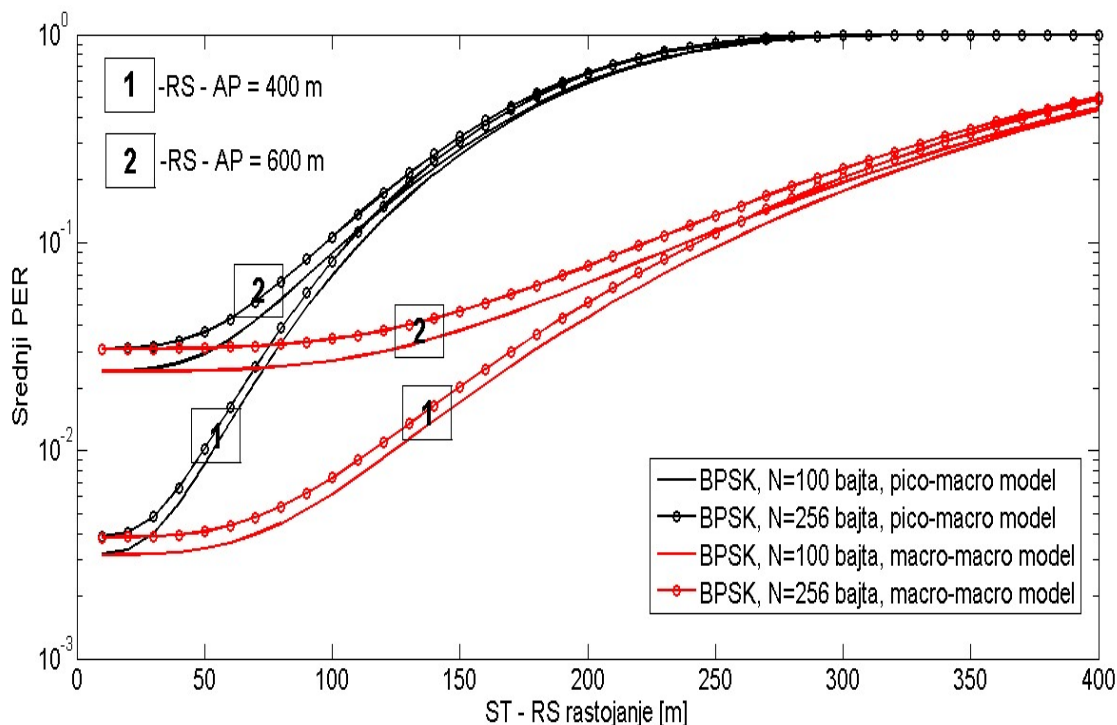
Dobijeni rezultati upućuju da su PER performanse u ovom slučaju dosta lošije u poređenju sa rezultatima dobijenim za ostale scenarije primjene, što je posljedica prirode ergodičnih feding kanala. Zahtijevani \overline{PER} , definisan minimalnom osjetljivošću prijemnika, ispunjen je kada su rastojanja kraća od 150 m, 220 m i 280 m za modulacione šeme 256QAM, 64QAM i 16QAM, respektivno. S obzirom na to da je ovaj scenario namijenjen pokrivanju šoping centara, stadiona i kampusa, i istovremeno zahtijeva veće protoke u odnosu na tradicionalne tehnologije većih dometa i veće domete od ostvarivih u postojećim Wi-Fi tehnologijama, onda IEEE 802.11ah sistemi mogu biti kompromisno rješenje, omogućavajući domete do 150 m za modulacije višeg nivoa.

5.2 PER performanse *uplink* komunikacije relejnog sistema

Povezivanje i prikupljanje informacija od senzora i brojila je prepoznato kao najperspektivniji scenario za primjenu IEEE 802.11ah sistema, imajući u vidu da se komunikacioni zahtjevi tih scenarija poklapaju sa inicijalnim motivima za uvođenje IEEE 802.11ah standarda. Ograničena predajna snaga senzora i brojila (1 mW) onemogućava IEEE 802.11ah sisteme u ispunjenju željenih dometa, uprkos modifikacijama i novitetima koje je uveo standard zbog povećanja dometa. *Uplink* komunikacija je generalno identifikovana kao najveći ograničavajući faktor za ostvarivanje željenih performansi u IEEE 802.11ah sistemima, što potvrđuju i PER performanse u scenarijima povezivanja senzora i brojila, prikazane na slici 5.3. Implementacija releja pokazala se kao tehnika koja omogućava poboljšanje performansi, pa je od interesa analiza PER performansi *uplink* komunikacije *dual-hop* IEEE 802.11ah relejnih sistema, koji su prilagođeni scenariju za bežične senzorske mreže. Kao u prethodnim analizama, podrazumijeva se da relej u prvom vremenskom intervalu dekodira primljeni signal, a onda ga kodira i prosljeđuje ka pristupnoj stanici (AP). Razmatran je slučaj *uplink* komunikacije za BPSK modulirane signale i paketi veličine 100 i 256 bajta. Gubici zbog srednjeg slabljenja signala uslijed propagacije na RS-AP linku računati su primjenom *macro* modela propagacije, a na ST-RS linku su analizirana oba propagaciona modela. Kao što je bio slučaj u prethodnim analizama, i ovdje RS-AP komunikacija podliježe Rajsovom blok fedingu ($K=9$ dB), a ST-RS link blok fedingu sa Rejljevom statistikom. Uticaj *multipath* blok fedinga na \overline{PER} računat je *Unit step* aproksimacijama za Rejljev (5.3) i Rajsov kanal (5.4).

Na slici 5.6 prikazani su rezultati za ukupnu srednju vjerovatnoću greške po paketu u zavisnosti od udaljenosti senzora od releja u *dual-hop* IEEE 802.11ah sistemima, primjenom relacije (3.16) za ukupni (*end-to-end*) \overline{PER} u *dual-hop* relejnim sistemima. Rezultati su dobijeni analitički, uzimajući u obzir dva slučaja: kada je relej postavljen na 400 m udaljenosti od AP, i kada je rastojanje među njima 600 m. Sa slike 5.6 se vidi da je zahtjev da \overline{PER} ne bude veći od 10^{-1} ispunjen za ST-AP rastojanja do 830 m, kada je RS postavljen na rastojanju 600 m od AP, ili 660 m, za RS-AP rastojanje od 400 m, u oba slučaja podrazumijevajući *macro* model propagacije na oba hopa. S obzirom na namjenu i način instalacije senzora i brojila, uslovi propagacije signala od senzora ka releju se realnije predstavljaju *pico* modelom

propagacije. U tom slučaju srednja vjerovatnoća greške po paketu je manja od 10^{-1} na ST-AP rastojanjima do oko 700 m (kada je RS-AP=600m), ili do 520 m (kada je RS-AP=400 m). Maksimalna rastojanja na kojima je ispunjen PER zahtjev dobijena su za pakete veličine 100 bajta, dok bi prenos paketa veličine 256 bajta za oko 10 m smanjilo rastojanja na kojima je ispunjen zahtjev po pitanju \overline{PER} .



Slika 5.6. PER performanse *dual-hop uplink* IEEE 802.11ah relejnih sistema

Dobijeni rezultati ukazuju da primjena releja u IEEE 802.11ah sistemima utiče na poboljšanje PER performansi, tačnije omogućava ispunjenje \overline{PER} zahtjeva na većim rastojanjima *uplink* komunikacije, približavajući ih inicijalno targetiranim dometima. Time se pokazuje opravdana perspektiva primjene IEEE 802.11ah sistema u scenarijima povezivanja senzora i brojila.

Glava 6

Zaključak

Ekspanzija aplikacija i uređaja koji su bazirani na M2M i IoT konceptima i izvjestan rast tržišta u ovim oblastima, uticali su na promjene u telekomunikacionoj industriji, usmjeravajući razvoj komunikacionih tehnologija ka traženju efikasnih i isplativih rješenja za ispunjavanje M2M i IoT telekomunikacionih zahtjeva, koji se u najvećoj mjeri odnose na energetski efikasan bežični prenos manje količine podataka, na većim rastojanjima. Nema sumnje da je IoT najperspektivniji segment telekomunikacionog tržišta, što potvrđuju i predikcije da će desetine milijardi različitih uređaja biti dio IoT koncepta u sljedećih nekoliko godina. IEEE 802.11 grupa, kao lider na polju standardizacije WLAN rešenja, 2017. godine je usvojila „ah“ amandman, prvo WLAN rješenje koje funkcioniše na nelicenciranim opsezima ispod 1 GHz i čije su modifikacije na fizičkom nivou i nivou linka kreirane sa ciljem ispunjavanja M2M i IoT komunikacionih zahtjeva. Pored benefita propagacije signala na frekvencijama ispod 1 GHz, IEEE 802.11ah definiše i značajno manje širine kanala (1 MHz i 2 MHz) u odnosu na one koje koriste većina tradicionalnih IEEE 802.11 standarda, kao i druge modifikacije na fizičkom nivou i nivou linka, sve u cilju postizanja komunikacionih dometa do 1 km, mogućnosti povezivanja do 6000 stanica na jednu pristupnu tačku i obezbjeđivanja brzine prenosa podataka od najmanje 100 kb/s.

U radu su analizirane performanse IEEE 802.11ah sistema koje se odnose na ostvarive domete, brzine prenosa podataka i kvalitet prenosa (BER/PER), kako bi se stekla realna slika o potencijalu Wi-Fi standarda namijenjenog M2M i IoT servisima, kao i o poziciji IEEE 802.11ah standarda u odnosu na druga Wi-Fi rješenja. Analiza performansi je obavljena kreiranjem odgovarajućih komunikacionih modela u Matlabu, a dijelom i analitičkim putem.

Uzeti su u obzir uticaj srednjeg slabljenja uslijed propagacije, *multipath* fading efekti i najrobustnije MCS, a primijenjeni su parametri definisani standardom, koji se razlikuje od regije do regije, i zavise od regulatorskih uslova. Dobijeni rezultati pokazuju da performanse IEEE 802.11ah sistema i te kako zavise od parametara (u najvećoj mjeri od predajne snage) koji su definisani za određenu regiju, pa tako i dostizanje inicijalnih ciljeva, u prvom redu ostvarivih komunikacionih dometa do 1 km, je uslovljeno definisanim predajnim snagama. Kada je maksimalna predajna snaga jednaka 1 W, performanse sistema na *downlink*-u, sa stanovišta ostvarivog dometa su približne inicijalno definisanim ciljevima, dok za komunikaciju na *uplink*-u i manje vrijednosti predajne snage na *downlink*-u, IEEE 802.11ah sistemi ne omogućavaju domete do 1 km, ni u slučaju izbora najrobustnijih parametara i u najpovoljnijim propagacionim uslovima. Akcenat istraživanja je na IEEE 802.11ah sistemima koje je moguće koristiti u Evropi, što implicira da je maksimalna dozvoljena predajna snaga pristupne tačke 10 mW, pa se pokazuje da su ostvarivi dometi u tom slučaju oko 490 m na *downlink*-a i 260 m na *uplink*-u, uzimajući u obzir najpovoljnije uslove propagacije i efekte *multipath* fadinga.

S obzirom na prepoznata ograničenja, u radu je analizirana i tehnika za povećanje ostvarivih dometa i poboljšanje performansi IEEE 802.11ah sistema putem primjene relejnih stanica. Primjenom polu-dupleks relejnog sistema, pri čemu relejna stanica obavlja dekodiraj-i-proslijedi obradu signala, uzimajući u obzir najrobustnije parametre i pretpostavljajući najpovoljnije propagacione uslove, ostvarivi dometi idu do 890 m na *downlink*-u (za sisteme koje je moguće razvijati u Evropi) i 670 m na *uplink*-u, uz ispunjenje zahtjeva za minimalnu ostvarivu brzinu prenosa od 100 kb/s. Analize BER i PER performansi IEEE 802.11ah sistema potvrđuju neophodnost primjene relejne komunikacije u IEEE 802.11ah sistemima, da bi ova tehnologija bila konkurentna među komunikacionim rješenjima za IoT aplikacije, naročito u Evropi, gdje je maksimalna snaga pristupne tačke (AP) ograničena na 10mW. Sa druge strane, u većini ostalih regiona svijeta, dozvoljena je maksimalna predajna snaga AP-a od 1W, pa će se čak i bez primjene relejnih stanica moći ostvariti ciljani dometi od oko 1km.

U prethodnih par godina Wi-Fi alijansa je stavila fokus na razvoj šeste generacije WLAN standarda, sa oznakom IEEE 802.11ax, tako da nije došlo do masovne proizvodnje IEEE 802.11ah čipova. Međutim, sada kada je i taj standard zaokružen, a sa druge strane i IoT tržište dovoljno razvijeno, očekuje se da počne primjena IEEE 802.11ah tehnologije u najrazličitijim IoT aplikacijama.

Literatura

- [1] K. Ashton - "*That 'Internet of Things' Thing, in the real world things matter more than ideas*", RFID Journal, June 22, 2009.
- [2] D. Evans - "*The Internet of Things – how the next evolution of the Internet is changing everything*", Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG), 2011.
- [3] "*IoT platforms: enabling the Internet of Things*", Ihs Tehnology, March, 2016.
- [4] P. Seixas - "*IOT Opportunities and Challenges*", Regional Forum on Emergent Technologies, 23-24 April 2019.
- [5] "*SigFox Vs. LoRa: A Comparison Between Technologies & Business Models*", LinkLabs, January 13, 2016.
- [6] M. Park - "*IEEE 802.11ah: Sub-1-GHz License-Exempt Operation for the Internet of Things*", IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 9, pp. 145-151, September, 2015.
- [7] IEEE Standard 802.11ah, 2016 (2017). 802.11ah-2016 IEEE Approved Draft Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements-Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Amendment 2: Sub 1 GHz License Exempt Operation, February, 2017.
- [8] E. Kocan, B. Domazetovic, M. Pejanovic-Djurisic - "*Range Extension in IEEE 802.11ah Systems Through Relaying*", Wireless Personal Communications, <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4334-9>, May 2017.
- [9] W. Sun, M. Choi and S. Choi - "*IEEE 802.11ah: A Long Range 802.11 WLAN at Sub 1 GHz*", River Publisher Journal, Article 2245 800X 115, 2013.
- [10] S. Aust, T. Ito - "*Sub 1GHz wireless LAN propagation path loss models for urban smart grid applications*", International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), pp. 116 – 120, Jan. 30 2012-Feb. 2, 2012.
- [11] A. Hazmi, J. Rinne and M. Valkama - "*Feasibility Study of IEEE 802.11ah Radio Technology for IoT and M2M use Cases*", GC'12 Workshop: Second International

- Workshop on Machine-to- Machine Communications 'Key' to the Future Internet of Things, pp. 1687 – 1692., 2012.
- [12] T. Adame, A. Bel, B. Bellalta, J. Barcelo, M. Oliver - “*IEEE 802.11ah: the WiFi approach for M2M communications*”, IEEE Wireless Communications, Volume: 21, Issue: 6, pp. 144 – 152., 2014.
- [13] E. Khorov, A. Lyakhov, A. Krotov, A. Guschin - “*A survey on IEEE 802.11ah: An enabling networking technology for smart cities. Computer Communications*”, Volume 58, pp. 53–69., 2015.
- [14] S. Aust, R. Prasad, I. G. M. M. Niemegeers - “*Outdoor Long-Range WLANs: A Lesson for IEEE 802.11ah. IEEE Communications Surveys & Tutorials*”, Volume: 17, Issue: 3, pp. 1761 - 1775., 2015.
- [15] B. Domazetović, E. Kočan, A. Mihovska - “*Performance evaluation of IEEE 802.11ah systems*”, In Telecommunications Forum (TELFOR), 24th, pp. 1-4, 2016.
- [16] A. Argyriou - “*Power-Efficient Estimation in IEEE 802.11ah Wireless Sensor Networks with a Cooperative Relay*”, IEEE International Conference on Communications (ICC), 2015., pp. 6755 – 6760., 2015.
- [17] S. N. Venkatasubramanian, K. Haneda, K. Yamamoto - “*System-level Performance of In-Band Full-Duplex Relaying on M2M Systems at 920 MHz*”, IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 81st, pp. 1-5, 2015.
- [18] S. Santi, A. Šljivo, L. Tian, E. D. Poorter, J. Hoebeke, J. Famaey - “*Supporting Heterogeneous IoT Traffic using the IEEE 802.11ah Restricted Access Window*”, SenSys '17: Proceedings of the 15th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems, 2017.
- [19] M. Z. Ali, J. Mišić, V. B. Mišić - “*Performance Evaluation of Heterogeneous IoT Nodes With Differentiated QoS in IEEE 802.11ah RAW Mechanism*”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume: 68, Issue: 4, April 2019.
- [20] A. Bishnu, V. Bhatia - “*Receiver for IEEE 802.11ah in Interference Limited Environments*”, IEEE Internet of Things Journal, Volume: 5, Issue: 5, Oct. 2018.
- [21] T. A. Riza, D. Gunavan - “*IEEE 802.11ah: Future Research Challenges and Opportunities*”, IEEE 10th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC), 2020.
- [22] R. de Vegt - “*Potential Compromise for 802.11ah Use Case Document*”, 2011.
- [23] M. Iwaoka - “*IEEE 802.11ah Use Case – Industrial Process Automation*”, 2011.

- [24] S. Kim - “*TGah Use Case – Outdoor Wi-Fi for cellular traffic offloading*”, 2011.
- [25] E. Perahia- “*Enabling Wi-Fi Internet of Things with 802.11ah Technology*”, Internet of Things Group, July 2015.
- [26] R. Porat - “*Traveling Pilots*”, IEEE 802.11-12/1322r0, Nov. 2012.
- [27] M. Park - “*IEEE 802.11 Wireless LANs Specification Framework for TGah doc*”, IEEE 802.11-11/1137r15doc, May 2013.
- [28] <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/20-years-of-wi-fi>
- [29] V. Ponnampalam, J. Wang , R. Porat - “*IEEE P802.11 Wireless LANs TGah - Outdoor Channel Models*” – Revised Text doc.: IEEE 802.11-11/0760r2, 2011.
- [30] B. Domazetović, E. Kočan - “*Energy efficiency improvement of wireless sensor networks through cooperative relaying*”, 20th International IT conference, Žabljak, 2015.
- [31] P. Ferrand, J.-M. Gorce, C. Goursaud - “*Approximations of the packet error rate under slow fading in direct and relayed links*”, Research Report RR-8316, INRIA. 2013.
- [32] A. Mahmood and R. J'antti - “*Packet Error Rate Analysis of Uncoded Schemes in Block-Fading Channels Using Extreme Value Theory*”, IEEE Comm. Letters ,Vol. 21, no. 1, pp. 208-211, Jan. 2017.
- [33] M. Abramovitz and I.A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables*, 9th edition, Dover, New York, 1972.
- [34] “*IEEE Standard for Information technology-- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 2: Sub 1 GHz License Exempt Operation*”, Standard by IEEE, April, 2017.
- [35] M. K. Simon and M-S. Alouini - “*Digital Communications over Fading Channels*”, Wiley, 5th edition, 2005.

Lista skraćenica

3GPP - *3rd Generation Partnership Project*

5G - *Fifth Generation*

AF - *Amplify-and-Forward*

AP - *Access Point*

ASK – *Amplitude Shift Keying*

AWGN - *Additive White Gaussian Noise*

BER - *Bit Error Rate*

BLE - *Bluetooth Low Energy*

BPSK - *Binary Phase Shift Keying*

CDF - *Cumulative Distribution Function*

DF - *Decode-and-Forward*

DH - *Dual Hop*

DL - *Downlink*

DPSK - *Diferential Pulse Shift Keying*

EC-GSM - *Enhanced Coverage Global System for Mobile Communications*

EVT – *Extreme Value Theory*

FDX - *Full Duplex*

FM – *Fade Margin*

FSK - *Frequency Shift Keying*

GI – *Guard Interval*

HDX - *Half-Duplex*

IAF – *Incremental Amplify-and-Forward*

IDF - *Incremental Decode-and-Forward*

IDFT- *Inverse Discrete Fourier Transform*

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IoT - *Internet of Things*

ISM - *Industrial, Scientific and Medical*

LDPC - *Low Density Parity Check*

LoRa - *Long Range*

LPWAN - *Low-Power Wide-Area Network*
LTE-M - *Long Term Evolution – Machine Type Communications*
M2M - *Machine to Machine*
MAC - *Medium Access Control*
MCS - *Modulation and Coding Scheme*
MDS- *Minimum Detectable Signal*
MIMO - *Multiple Input Multiple Output*
MSK - *Minimum Shift Keying*
NB-IoT - *Narrowband IoT*
NF - *Noise Figure*
NLoS - *Non Line of Sight*
OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
PAM - *Pulse Amplitude Modulation*
PDF - *Probability Density Function*
PDP - *Power Delay Profile*
PER - *Packet Error Rate*
PL - *Path Loss*
PSK - *Pulse Shift Keying*
QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*
QoS - *Quality of Service*
RAW - *Restricted Access Window*
RS - *Relay Station*
S1G- *Sub-1 GHz*
SER - *Symbol Error Rate*
SH - *Single Hop*
SISO - *Single Input Single Output*
SNR - *Signal to Noise Ratio*
ST - *Station*
TGah -*IEEE 802.11ah Task Group*
UL - *Uplink*
Wi-Fi - *Wireless-Fidelity*
WLAN - *Wireless Local Area Network*
WSN - *Wireless Sensor Networks*