



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
U NOVOM SADU



**ANALIZA ENERGETSKE EFIKASNOSTI
ISPORUKE MULTIMEDIJALNIH SERVISA
U MOBILNIM ĆELIJSKIM SISTEMIMA
ČETVRTE GENERACIJE (LTE/ LTE-A)**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor:
Prof. dr Dejan Vukobratović

Kandidat:
mr Dragan Rastovac

Novi Sad, 2016.

**Analiza energetske efikasnosti isporuke
multimedijalnih servisa u mobilnim ćelijskim
sistemima četvrte generacije (LTE/LTE-A)**

mr Dragan Rastovac

Fakultet tehničkih nauka

Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije

Katedra za telekomunikacije i obradu signala

Novi Sad

2016.

Mentor: Prof. dr Dejan Vukobratović

Katedra za telekomunikacije i obradu signala,
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.

Članovi komisije:

Prof. dr Zorica Nikolić, predsednik

Katedra za telekomunikacije,
Elektronski fakultet, Niš.

Prof. dr Vojin Šenk,

Katedra za telekomunikacije i obradu signala,
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.

Prof. dr Vlado Deliće,

Katedra za telekomunikacije i obradu signala,
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.

Doc. dr Milan Narandžić,

Katedra za telekomunikacije i obradu signala,
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.

Radovi objavljeni iz oblasti disertacije

M23 časopis:

C. Khirallah, D. Rastovac, D. Vukobratović, J. S. Thompson: "Energy Efficient Multimedia Delivery Services over LTE/LTE-A," IEICE Transactions on Communications, Vol. E-97B, No. 08, August 2014.

M33 (međunarodne) konferencije:

D. Rastovac, C. Khirallah, D. Vukobratović, J. S. Thompson, "The Design of Multimedia Multicasting Services in LTE HetNets Using Stochastic Geometry," IEICE Information and Communications Technology Forum ICTF 2015, Manchester, UK, June 2015.

D. Rastovac, C. Khirallah, D. Vukobratović, J. S. Thompson, "Energy Efficiency of Video Broadcasting Services in LTE Heterogeneous Networks," IEICE Information and Communications Technology Forum ICTF 2013, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, May 2013.

Ključna Dokumentacijska Informacija

Redni broj, RBR :	
Identifikacioni broj, IBR :	
Tip dokumentacije, TD :	monografska publikacija
Tip zapisa, TZ :	štampan tekstualni materijal
Vrsta rada, VR :	doktorska teza
Autor, AU :	Dragan Rastovac, mr
Mentor, MN :	dr Dejan Vukobratović
Naslov rada, NR :	Analiza energetske efikasnosti isporuke multimedijalnih servisa u mobilnim ćelijskim sistemima četvrte generacije (LTE/LTE-A)
Jezik publikacije, JP :	srpski
Jezik izvoda, JI :	srpski i engleski
Zemlja publikovanja, ZP :	Srbija
Uže geografsko poručje, UGP :	Vojvodina
Godina, GO :	2016.
Izdavač, IZ :	Fakultet tehničkih nauka
Mesto i adresa, MA :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6.
Fizički opis rada, FO :	6 poglavlja, 132 strane, 75 slika, 13 tabela, 147 citata
Naučna oblast, NO :	elektrotehničko i računarsko inženjerstvo
Naučna disciplina, ND :	telekomunikacije, mobilne radio komunikacije
Predmetna odrednica / Ključne reči, PO :	ćelijski sistem, LTE/LTE-A, eMBMS verovatnoća pokrivenosti, stohastička geometrija
UDK :	
Čuva se, ČU :	u biblioteci Fakulteta tehničkih nauka
Važna napomena, VN :	

Izvod, AB :	U ovoj disertaciji razvijeni su analitički alati za izračunavanje protoka servisa, propusnog opsega i uštede energije zahtevanim u različitim eMBMS LTE/LTE-A servisnim strukturama. Takođe, mi smo analizirali protok podataka i optimalnu dodelu parametara za prenos na fizičkom sloju za eMBMS baziran video servis u 2-klasnoj heterogenoj mreži primenom stohastičke geometrije
Datum prihvatanja teme, DP :	17. april 2014.
Datum odbrane, DO :	
Članovi komisije, DB :	
Predsednik:	dr Zorica Nikolić, Elektronski fakultet, Niš
Član:	dr Vojin Šenk, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
Član:	dr Vlado Delić, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
Član:	dr Milan Narandžić, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
Mentor:	dr Dejan Vukobratović, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
Potpis mentora:	

Key Words Documentation

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	monographic publication
Type of record, TR :	printed textual material
Contents code, CC :	doctoral dissertation
Author, AU :	Dragan Rastovac, M.Sc.
Advisor, MN :	Dejan Vukobratović, PhD
Title, TI :	Analysis of Energy Efficient Delivery Multimedia Services in Mobile Cellular System Fourth Generation (LTE/LTE-A)
Language of text, LT :	serbian
Language of abstract, LA :	serbian and english
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	Vojvodina
Publication year, PY :	2016.
Publisher, PB :	Faculty of Technical Sciences
Publication place, PP :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6.
Physical description, PD :	6 chapters, 132 pages, 75 figures, 13 tables, 147 references
Scientific field, SF :	electrical and computer engineering
Scientific discipline, SD :	telecommunications, mobile radio communication
Subject / Key words, S/KW :	cellular system, LTE/LTE-A, eMBMS coverage probability stochastic geometry
UC :	
Holding data, HD :	the library Faculty of Technical Sciences
Note, N :	

Abstract, AB :	In this dissertation we develop simple analytical tools for evaluation of average service data rates, bandwidth and energy consumption requirements in different eMBMS LTE/LTE-A service configurations. Also, we consider a simple approach to estimate achievable rates and optimally assign the physical layer transmission parameters for eMBMS based video service in the two-tier heterogeneous cellular systems.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	17th of April 2014.
Defended on, DE :	
Defense Board, DB : President: Member: Member: Member: Mentor:	Zorica Nikolić, PhD, Faculty of Electronic Engineering, Niš Vojin Šenk, PhD, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad Vlado Delić, PhD, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad Milan Narandžić, PhD, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad Dejan Vukobratović, PhD, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad
Menthor's sign:	

Zahvalnica

Želim da izrazim najveću zahvalnost svom mentoru prof. dr Dejanu Vukobratoviću na neizmernoj pomoći i savetima tokom izrade disertacije. Takođe se zahvaljujem članovima komisije na ukazanim sugestijama.

Disertaciju želim da posvetim svojoj supruzi Danijeli, ćerki Dragani i sinu Nikoli, kao i svojoj porodici u znak zahvalnosti na podršci, strpljenju i razumevanju.

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Osnove mobilnih ćelijskih sistema	7
2.1	Ćelijski koncept	7
2.1.1	Sektorizacija ćelija	7
2.1.2	Podela ćelije u MCN	13
2.2	Heterogene ćelijske mreže	14
2.3	Poisson-ov proces generisanja tačaka	16
2.3.1	Proces generisanja tačaka (Point Process)	16
2.3.2	Voronoi dijagrami	18
2.3.3	Raspodela baznih stanica Poisson-ovim procesom	18
3	Modelovanje mobilne bežične mreže	21
3.1	Korisnik u mobilnoj bežičnoj mreži	21
3.2	Modelovanje prostiranja signala u mobilnim bežičnim mrežama	23
3.2.1	Prenos signala kroz slobodan prostor	27
3.2.2	Empirijsko (statističko) modelovanje u mobilnim bežičnim mrežama	28
3.2.3	Determinističko (fizičko) modelovanje u mobilnim bežičnim mrežama	32
3.2.4	Modelovanje mobilnog kanala Markovljevim lancima	33
3.2.5	Modelovanje FSMC modela za OFDM sisteme	37

3.3	Modelovanje mobilne bežične mreže primenom stohastičke geometrije	41
3.3.1	Modelovanje stohastičkom geometrijom	41
3.3.2	Osnovni parametri stohastičke geometrije	44
4	LTE/LTE-A tehnologija i MBMS servis	49
4.1	LTE/LTE-A	49
4.1.1	Arhitektura LTE/LTE-A mreže	49
4.2	MBMS servis	66
4.2.1	Arhitektura MBMS servisa	66
4.3	Energetska i spektralna efikasnost u heterogenim ćelijskim mrežama	83
4.3.1	Proračun energetske efikasnosti	84
4.3.2	Proračun spektralne efikasnosti	85
4.3.3	Odnos energetske efikasnosti i spektralne efikasnosti	85
4.3.4	Analiza energetske efikasnosti u heterogenim ćelijskim mrežama	88
5	Dizajn i analiza eMBMS servisa u LTE/LTE-A mrežama	93
5.1	Dizajn i analiza eMBMS servisa u LTE/LTE-A mrežama primenom 3GPP heksagonalnog modela	93
5.1.1	Model sistema za emitovanje video sadržaja u LTE/LTE-A mrežama	93
5.1.2	Evaluacija propusnog opsega i energetska efikasnost isporuke video sadržaja eMBMS servisom u LTE/LTE-A	103
5.1.3	Analiza isporučenog protoka i energetska potrošnja u SFN- eMBMS i SC- eMBMS servisima	105
5.2	Dizajn i analiza eMBMS servisa u LTE/LTE-A mrežama primenom stohastičke geometrije	110
5.2.1	Model sistema	110
5.2.2	eMBMS video multicast bazirani servis za LTE-A HetNets	112
6	Zaključak	117

Spisak slika

1.1	Razvoj mobilnih bežičnih komunikacionih standarda	4
2.1	Geometrijski oblici predstavljanja MCN-e	8
2.2	Sektori u okviru ćelije	9
2.3	Položaj eNB-e u MCN-i	9
2.4	MCN od 19 makro eNB-a	10
2.5	Izgled makro ćelijskog klastera za: a) $S = 3$ i b) $S = 4$	11
2.6	Raspodela grupe frekvencija za vrednost parametara pomeraja $i = 2$ i $j = 1$	12
2.7	Raspodela frekvencijskih kanala (klaster sa 7 ćelija)	13
2.8	Podsektorizacija ćelije	14
2.9	Heterogena ćelijska mreža	15
2.10	Poisson-ov proces za $\lambda = 4$	17
2.11	Realizacija Voronoi poligona	19
2.12	Raspodela eNB-a Poisson-ovim procesom za $K = 1$	20
2.13	Raspodela eNB-a Poisson-ovim procesom za $K = 2$	20
3.1	Pozicija korisnika u oblasti bazne stanice	21
3.2	Tilt-ugao zakrivljenosti antene po horizontalnom i vertikalnom pravcu	22
3.3	UE-v SNR (jedan heksagon) bez tilta	23
3.4	UE-v SNR (tri sektora) sa tiltom	24
3.5	Efekti prostiranja	25

3.6	Ilustracija brzog i sporog fadinga	25
3.7	Klasifikacija fading kanala (preuzeto iz [1])	26
3.8	Doplerov efekat	26
3.9	Two ray model	33
3.10	Gilbert-Elliott model kanala.	35
3.11	Primer podele SNR na n intervala	37
3.12	Vremensko-frekvencijsko predstavljanje jednog OFDM signala (preuzeto iz [2]).	39
3.13	Wyner model-linearna verzija.	42
3.14	a)Heksagonalni model b)Aktuelni 4G model c)PPP model	47
4.1	LTE arhitektura mreže	50
4.2	Korisnički terminal	51
4.3	Paketska prenosna mreža-EPC	53
4.4	Radio pristupna mreža E-UTRAN	54
4.5	Agregacija nosilaca	54
4.6	Relej čvor	55
4.7	Struktura korisničke ravni LTE protokola	55
4.8	Protokol stek na eNB-UE interfejsu: a) korisnička i b) kontrolna ravan	57
4.9	Frejm struktura LTE (preuzeti iz [3])	58
4.10	Fizički resursi u vremensko-frekvenciskoj dimenziji (preuzeto iz [4])	58
4.11	Mapiranje downlink kanala.	62
4.12	Tok downlink paketa	63
4.13	Faze transportnog a) i fizičkog b) kanala (Release 8 i 9)	65
4.14	Broadcast (a) i Unicast (b) prenos	67
4.15	MBMS arhitektura	67
4.16	SFN-MBMS oblasti	68
4.17	Kontrolna ravan MBMS servisa	69
4.18	Korisnička ravan MBMS servisa	70
4.19	Mapiranje downlink LTE-MBMS kanala.	71
4.20	Mapiranje MBMS kanala za više SFN-MBMS oblasti	71
4.21	Ažuriranje MCCH informacije	72
4.22	Raspodela MBMS frejma (preuzeto iz [5])	73

4.23	Session Start procedura (preuzeto iz [6])	75
4.24	MCCH Information Acq. and MRB procedura (preuzeto iz [6])	76
4.25	MBMS Session Update procedura (preuzeto iz [6])	77
4.26	MBMS Session Stop procedura (preuzeto iz [6])	77
4.27	MRB Release procedura (preuzeto iz [6])	78
4.28	Intra i inter Joint Transmission	80
4.29	Dynamic Cell Selection	81
4.30	Coordinated scheduling	81
4.31	Coordinated beamforming	82
4.32	Coordinated beamforming/scheduling	82
4.33	MBMS Counting procedura (preuzeto iz [6])	83
4.34	Prikaz kompromisa četiri krive za idealan slučaj i slučaj u praksi (EE-energetska efikasnost, DE-efikasnost raspodele, SE-spektralna efikasnost, PW-snaga, DL-kašnjenje, BW-propusni opseg, pre- uzeto iz [7])	88
5.1	LTE/LTE–A model sistema za SC i SFN- eMBMS servis	95
5.2	Proces prenosa PHY TB u FSMC modelu	98
5.3	Propusni opseg (u MHz/channel) za SC i SFN-eMBMS servis.	106
5.4	Potrošnja energije (u Joule/channel) za SC i SFN-eMBMS servis.	107
5.5	Potrošnja energije (u Joule/channel) za SC-eMBMS servis.	108
5.6	Prosečna potrošnja energije eMBMS servisa za različite HetNets konfiguracije u funkciji gustine UE-a ($R=256$ kbit/s).	108
5.7	Propusni opseg i utršak energije po jedinici servisa video kanala (video kanal MOS).	109
5.8	Poređenje P_c 3GPP modela i modela stohastičke geometrije za 1-klasne mreže (samo makro eNB-e).	111
5.9	Poređenje P_c 3GPP modela i modela stohastičke geometrije za 1-klasne mreže (samo piko eNB-e).	112
5.10	Poređenje P_c 3GPP modela i modela stohastičke geometrije za 2-klasne mreže (makro+piko eNB-a).	113
5.11	Prosečan protok podataka za odnos snaga ($P_1/P_2 = 25;100;250$) i odnos gustina ($\lambda_1/\lambda_2=2$).	115
5.12	Prosečan protok podataka za odnos snaga ($P_1/P_2=25$) i odnos gustina ($\lambda_1/\lambda_2=2;4;8$).	116

5.13	Prosečan protok podataka za odnos snaga ($P_1/P_2=25;100;250$) i odnos gustina ($\lambda_1/\lambda_2=2;4;8$).	116
------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Spisak tabela

2.1	Veličina klastera N na osnovu pojedinih vrednosti i i j (preuzeto iz [8]).	13
2.2	Parametri makro, mikro, piko i femto ćelija (preuzeto iz [9]) . . .	15
3.1	Path loss eksponent za različite unutrašnje i spoljašnje sredine (preuzeto iz [10]).	28
3.2	Pregled FSMC modela (preuzeto iz [11]).	38
4.1	Kategorije UE-a (preuzeto iz [12]).	51
4.2	Protokoli u korisničkoj ravni.	56
4.3	Protokoli u kontrolnoj ravni.	56
4.4	Frekvencijski spektar i specifikacija resursa (preuzeto iz [13]). . .	57
4.5	Uporedne karakteristike LTE i LTE-A [14] [15].	59
4.6	Logički kanali.	60
4.7	Transportni kanali.	61
5.1	CQI vrednosti i odgovarajuće veličine TB.	94
5.2	Parametri LTE/LTE-A mreže	96

Spisak skraćenica

3GPP	.....	Third-Generation Partnership Project
AEE	.....	Area Energy Efficiency
AMC	.....	Adaptive Modulation and Coding
AWGN	.....	Additive white Gaussian noise
BCCH	.....	Broadcast Control Channel
BCH	.....	Broadcast Channel
BMSC	.....	Broadcast/Multicast Service Center
BW	.....	Bandwidth
CAPEX	.....	Capital Expenditure
CB	.....	Coordinated beamforming
CDMA	.....	Code Division Multiple Access
CN	.....	Core Network
CoMP	.....	Coordinated Multipoint Transmission
CRC	.....	Cyclic Redundancy Check
CQI	.....	Channel Quality Indicator
CS	.....	Coordinated scheduling
CSA	.....	Common Subframe Allocation
CSI	.....	Channel State Information
CSI-RS	.....	Channel-State Information Reference Signal
CSR	.....	Cell-Specific Reference Signals
DE	.....	Deployment Efficiency

DL-SCH	Downlink Shared Channel
DMC	Discrete Memoryless Channel
DM-RS	Demodulation Reference Signal
DPS	Dynamic Point Selection
DTCH	Dedicated Traffic Channel
ECR	Energy Consumption Ratio
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution
EE	Energy Efficiency
eMBMS	Evolved Multimedia Multicast/Broadcast Service
eNB	Evolved NodeB
EoS	Energy of Service
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
FSC	Finite State Channel
FSMC	Finite State Markov Chain
GEC	Gilbert-Elliott Channel
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GPRS	Generalized Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HDTV	High Definition Television
HetNets	Heterogeneous networks

HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
HSUPA	High-Speed Uplink Packet Access
ICI	Inter-Cell Interference
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IP	Internet Protocol
IS-54	Interim Standard 54
ISD	Inter-Site Distance
ISI	Inter-Symbol Interference
JT	Joint Transmission
LCR	Level Crossing Rates
LOS	Line-of-Sight
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution-Advanced
MAC	Medium Access Control
MBMS GW ...	MBMS Gateway
MCCH	Multicast Control Channel
MCE	Multi-cell multicast Coordination Entity
MCH	Multicast Channel

MCN	Mobile Cellular Network
ME	Mobile Equipment
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
MRB	Point-to-multipoint Radio Bearer
MRNTI	MBMS Radio Network Temporary Identifier
MSA	MCH sub frame allocation
MSI	MCH Scheduling Information
MSP	MCH Scheduling Period
MT	Mobile termination
MTCH	Multicast Traffic Channel
NAS	Non-Access Stratum
NLOS	Non-Line-of-Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OPEX	Operational Expenditure
PCCH	Paging Control Channel
PCH	Paging Channel
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PDCP	Package Data Convergence Protocol
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel

P-GW ili PDN	Packet Data Network Gateway
PHY	Physical
PMCH	Physical Multicast Channel
PP	Point Process
PPP	Poisson point process
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RB	Resource Block
RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controller
RRC	Radio Resource Control
SAE	System Architecture Evolution
SC-MBMS	Single-Cell MBMS
SE	Spectral Efficiency
SFN-MBMS ..	Single-Frequency Network MBMS
SGSN	Serving GPRS Support Node
S-GW	Serving Gateway
SIB	System Information Block
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio

SIR	Signal-to-Interference Ratio
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TB	Transport Block
TDMA	Time Division Multiple Access
TE	Terminal equipment
TEER	Telecommunications Energy Efficiency Ratio
UE	User Equipment
UICC	Universal integrated circuit card
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VoIP	Voice over Internet Protocol
WCDMA	Wideband Code-Division Multiple Access
Wi-Fi	Wireless-Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Networks

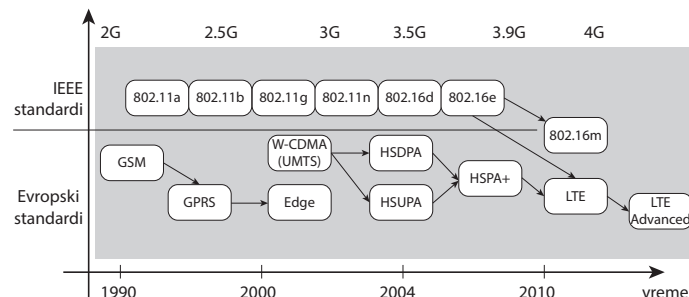
Zainteresovanost korisnika za pristup bežičnim širokopoljnim komunikacionim sistemima je velika i neprestano raste. Između ostalog, ovakvo interesovanje se može opravdati multimedijalnim servisima visokog kvaliteta koje ove mreže podržavaju. Mobilni komunikacioni sistemi omogućavaju mnogo novih aplikacija, veću fleksibilnost za korisnika, poboljšanje kvaliteta i efikasnosti života i poslovnih procesa. Sve više i više korisnika Interneta teži ka potpunoj mobilnosti koja se manifestuje upotrebom uređaja sa velikim ekranom (poput smartphonea, tableta, netbooka). Pomenuti uređaji zahtevaju visoke performanse i zbog toga raste potražnja za mobilnim protokom podataka. Procene pokazuju povećanje mobilnog saobraćaja za 26 puta u periodu između 2010-2015. godine. Samo u 2015. godini, u proseku, pametni uređaji (Smart Device) su generisali 15 puta više mobilnog saobraćaja od ostalih, sa naznakom da su mobilne video usluge činile više od 65% saobraćaja. Takođe treba napomenuti da se u periodu između 2015-2020. godine očekuje povećanje mobilnog saobraćaja za 8 puta sa ukupnom godišnjom stopom rasta od 53%. U 2015. godini mobilni saobraćaj je imao udeo od 5% u ukupnom saobraćaju (fiksno i mobilno), a za očekivati je da taj procenat poraste na 15% do 2020. godine [16].

Prva generacija mobilnih ćelijskih sistema (1G), pojavila se u Japanu 1979. godine. Ona se zasnivala na analognoj tehnologiji i oslanjala se isključivo na govornu komunikaciju. 1G je imala mali kapacitet, ograničenu zonu pokrivanja, dok njeni pojedini sistemi u različitim državama nisu bili međusobno kompatibilni. Druga generacija mobilnih ćelijskih sistema (2G), uvedena je na početku devedesetih godina 20. veka. Ona je koristila digitalnu modulaciju, obezbedila je poboljšanu spektralnu efikasnost i kvalitet zvuka i bila je kompatibilna sa digitalnom fiksno mrežom [17]. U ovom periodu došlo je do standardizacije 2G sistema, što je omogućilo zamenu velikog broja različitih

ćelijskih sistema prethodne generacije. Dva široko rasprostranjena 2G ćelijska sistema bili su evropski GSM (Global System for Mobile Communications-globalni sistem za mobilne komunikacije) i severno-američki IS-54 (Interim Standard 54). Oba standarda zasnivala su se na TDMA (Time Division Multiple Access-višestruki pristup sa vremenskom raspodelom) tehnologiji i prenosom podataka komutacijom kola (circuit-switched data). GSM sistem je podržavao prenos podataka do 10 kbit/s i govorni servis protoka 13 kbit/s. GSM standard je unapređen GPRS (Generalized Packet Radio Service) standardom koji je podržavao prenos podataka putem komutacije paketa (packet-switched data) protoka do 171 kbit/s. GPRS tehnologiju je nasledila EDGE (Enhanced Data Rates for Global Evolution) koja je uvela 8-PSK (Phase Shift Keying) modulacionu shemu i prenos podataka do 384 kbit/s. IS-54 standard je svoje prvo unapređenje zasnovao na CDMA (Code Division Multiple Access-višestruki pristup u prošrenom spektru) tehnologiji. CDMA je imala propusni opseg širine 1.2 MHz i maksimalni protok od 14 kbit/s po govornom kanalu. 3GPP (Third-Generation Partnership Project) je prvobitno namenjen za standardizaciju u Evropi, a kasnije je prerastao u svetsku standardizacionu organizaciju. 3GPP je uspostavio tehničke specifikacije počevši od 3G mobilnih sistema na dalje. 3GPP je 1997. godine počeo da radi na standardizaciji sa oznakom ITU IMT-2000 (International Telecommunications Union International Mobile Telecommunication). Cilj je bio prelazak sa TDMA tehnologije na CDMA koja se nazivala UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). UMTS je standardizovan 2001. godine u 3GPP Release 4 (izdanje-tehnička specifikacija 3GPP) i ostvarivao je 2 Mbit/s prenos podataka u downlink-u. Njegova nadogradnja je HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) 2005. godine u 3GPP Release 5 sa prenosom podataka od 14 Mbit/s. Ovaj standard omogućavao je bržu isporuku podataka upotrebom manjih podfrejmova i 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) modulacione sheme. 3GPP Release 6 standardizovao je 2004. godine HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access) sa maksimalnim prenosom podataka 5.7 Mbit/s. HSDPA i HSUPA poznati su kao HSPA (High-Speed Packet Access) koji je nadograđen u 3GPP Release 7 i nazvan HSPA+ ili MIMO (Multiple Input Multiple Output) HSDPA. Ovaj standard prenosio je podatke sa protokom 14 Mbit/s korišćenjem 2x2 MIMO tehnike prenosa (MIMO-predstavlja sistem

od više predajnih i više prijemnih antena) i 64QAM modulacionom shemom. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) predstavlja telo koje je počelo da radi na razvoju standarda za bežične lokalne mreže WLAN (Wireless Local Area Network) i bežične metropoliten mreže WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks). Ovde su uključeni WiFi (802.11a/b/g/n) i WiMAX standardi (802.11d/e/m). IEEE je u ovim standardima definisala novu tehnologiju bežičnog interfejsa (air-interface) OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Ovim je IEEE 802.11a WLAN standard kroz propusni opseg od 5 MHz postigao prenos podataka do 54 Mbit/s. IEEE je 2006. godine standardizovao WiMAX (IEEE 802.16m) sa propusnim opsegom do 20 MHz koji je imao bolje karakterisitke od UMTS i HSPA [18]. Istovremeno 3GPP razvija verziju beyond 3G (narednih 3G) sistema, koji su poznatiji kao E-UTRA (Evolved Universal Terrestrial Radio Access) i E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network), koji su zasnovani na OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) tehnologiji i mrežnoj arhitekturi sličnoj Mobile WiMAX [19]. LTE (Long Term Evolution) tehnologija predstavlja globalni standard, poznat kao 3GPP za četvrtu generaciju mobilnih ćelijskih mreža (4G), koji podržavaju svi važniji operateri na tržištu. Namena LTE je unapređenje UMTS-a. Proces rada na LTE standardizaciji započet je 2004. godine a specifikacija njegovog interfejsa je završena sa Release 8. Release 9 unosi poboljšanja za LTE dok u Release 10 nastaje LTE-A (Long Term Evolution-Advanced) [20]. LTE-A ima zadatak da ostvari bolju spektralnu efikasnost u poređenju sa LTE, zadržavajući kompatibilnost sa LTE jer predstavlja njegovu unapređenu verziju. Blok dijagram razvoja mobilnih bežičnih komunikacionih standarda predstavljen je na slici 1.1.

Veliki broj istraživanja tokom poslednjih nekoliko godina u bežičnim mrežama doprineo je poboljšanju energetske efikasnosti uređaja kojima se upravlja pomoću baterija. Na taj način ostvaruje se produženje životnog veka senzorskih čvorova i mobilnih terminala [21]. Međutim, u skorije vreme mogući štetni efekti uzrokovani emisijama CO_2 i iscrpljivanjem neobnovljivih resursa, iznova su naglasili važnost razvijanja energetske efikasne mrežne infrastrukture koja će moći da zadovolji rastuće potrebe uz minimalnu potrošnju energije [22]. Procena je da na informacionu i komunikacionu industriju odlazi 3% godišnje potrošnje električne energije u svetu kao i da ove industrije uzrokuju 2%



Slika 1.1: Razvoj mobilnih bežičnih komunikacionih standarda

ukupne emisije CO_2 . Desetina ove potrošnje se može pripisati mobilnim ćelijskim mrežama (na dalje MCN-Mobile Cellular Network) [23]. Smanjenje potrošnje energije nije samo stvar društvene odgovornosti prema životnoj sredini, već je čvrsto povezana sa poslovnim preživljavanjem operatera MCN-a u narednim godinama. Oni imaju ogromne izdatke za operativne troškove (Operational Expenditure-OPEX). Procenjuje se da potrošnja energije raste 15-20% godišnje i udvostručava svakih nekoliko godina samo u oblasti informacione i komunikacione industrije. Ovo će nesumnjivo uticati na povećanje OPEX-a za operatere MCN-a, navodi se u studiji ABI Research [24]. Iz toga proizilazi da je smanjivanje rasta OPEX-a od ključnog značaja za nastavak uspeha operatera. U novije vreme, pažnju istraživača privukao je problem minimizacije ukupne potrošnje energije u radio pristupnoj mreži koja se u 4G sistemima sastoji ne samo iz makro ćelija (velikih baznih stanica-na dalje eNB-evolved NodeB) nego i iz tzv. malih ćelija (Small Cells)- mikro/piko/femto u okviru koncepta heterogenih mreža (Heterogeneous networks, na dalje HetNets). U tu svrhu, energetska efikasna isporuka servisa treba da odabere optimalne konfiguracije HetNets koje su istovremeno i robusne kako bi osigurale željenu uslugu.

Polazeći od navedenih činjenica predmet istraživanja disertacije zasnivaće se na analizi 4G multimedijalnih servisa kao što su 3GPP eMBMS (evolved Multimedia Multicast/Broadcast Service) čiji zahtevi treba da ispune uslov visokog kvaliteta dodele video servisa sa velikom verovatnoćom pokrivenosti. eMBMS servis dodeljivaće se preko LTE/LTE-A infrastrukture. U disertaciji će biti razvijeni analitički alati za evaluaciju digitalnog protoka servisa, potrebnog propusnog opsega i uštede energije zahtevanim u različitim eMBMS

LTE/LTE-A servisnim strukturama baziranim na makro-ćelijskim i HetNets MCN-a. Poglavlje jedan predstavlja uvodno poglavlje u kome su navedeni kratak sadržaj, motivacija i cilj disertacije. U poglavlju dva dat je detaljan prikaz osnova mobilnih ćelijskih sistema: ćelijski koncept, heterogene ćelijske mreže, Poisson-ov proces generisanja tačaka kao model raspodele eNB-a u modernim HetNets MCN-a. Poglavlje tri ima definisane dve celine. Prva obuhvata osnovne teorijske pojmove modelovanja prostiranja signala (primenom standardnog heksagonalnog modela) u MCN-a i to: prenos signala kroz slobodan prostor, prostiranja u unutrašnjosti objekata, najznačajnije empirijske i determinističke modele i FSMC (Finite State Markov Chain-Markovljev lanac sa konačnim brojem stanja) model. U drugoj celini dat je teorijski pregled modelovanja MCN-a primenom stohastičke geometrije: uzroci nastanka primene modelovanja stohastičkom geometrijom i osnovni parametri stohastičke geometrije. U poglavlju četiri analizira se: arhitektura LTE/LTE-A sistema, struktura fizičkog sloja LTE/LTE-A, arhitektura MBMS sistema, energetska i spektralna efikasnost u HetNets. Nadalje, u petom poglavlju takođe imamo dve celine. U prvoj je analizirana ušteda energije u različitim eMBMS LTE/LTE-A servisnim strukturama baziranim na makro-ćelijskim i HetNets MCN-a primenom 3GPP modela. Makro eNB-e koriste heksagonalanu strukturu (tri prstena u heksagonalnoj rešetki sa ukupno 19 eNB-a). HetNets čine makro eNB-e raspodeljene u heksagonalnoj rešetki, dok su dodatne mikro i piko eNB-e slučajno raspodeljene (po Poisson-ovoj raspodeli). Druga celina predstavlja analizu 2-klasne HetNet mreže modelovane jednačinama stohastičke geometrije. Šesto poglavlje predstavlja zaključna razmatranja i neke ideje za nastavak istraživanja.

Glava 2

Osnove mobilnih ćelijskih sistema

U ovoj disertaciji, posmatramo isporuku multimedijalnog sadržaja preko makro ćelijskih i HetNets sistema u urbanim sredinama. Prema tome jedan od ključnih aspekata za analizu performansi isporuke multimedijalnog sadržaja je arhitektura (raspodela eNB-a) MCN-e. Iz tog razloga, potrebno je da znamo realistične modele raspodele eNB-a. Poglavlje počinje heksagonalnim modelom, jer je on tradicionalan. Međutim, u današnjim urbanim sredinama čak i makro eNB-e nisu heksagonalno raspodeljene, već sve bliže prate Poisson-ov proces raspodele. Na taj način u urbanim oblastima, Poisson-ov model nije više standard samo za modelovanje potpuno slučajne raspodele lokacija malih ćelija, već se sve više univerzalno koristi i za makro ćelije.

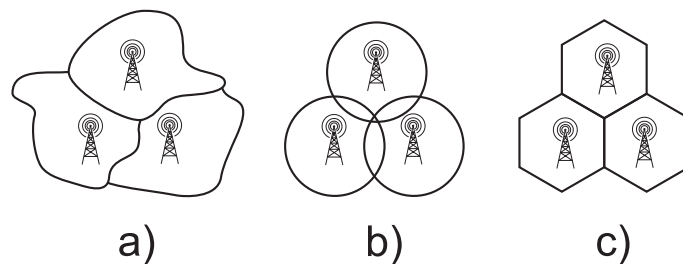
2.1 Ćelijski koncept

Osnovni zadatak MCN-e jeste pružanje mobilnih komunikacionih servisa u geografskoj oblasti pokrivanja korišćenjem sistema eNB-a. Oblast koju pokriva jedna eNB-a naziva se ćelija. Ćelija čiji je poluprečnik reda veličine 1–10 km naziva se makro ćelija. Makro ćelija obezbeđuje glavnu infrastrukturnu pokrivenost za MCN-e [25]. Osnovni parametri eNB-e makro ćelije su: visina antene (oko 20 m), poluprečnik pokrivanja, broj sektora, snaga (reda veličine 10–100 W), frekvencija nosioca. Antene eNB-a makro ćelija se montiraju na stubovima, krovovima i drugim postojećim objektima, na visini koja omogućava jasan pogled na okolinu. Poluprečnik ćelije za vangradska područja može iznositi do 20 km, a za gradska manje od 3 km.

2.1.1 Sektorizacija ćelija

Prilikom opisa sektorizacije MCN-e koriste se tri modela:

- radio - prikazuje realnu pokrivenost MCN-e, slika 2.1a
- kružni - prikazuje idealnu pokrivenost MCN-e, slika 2.1b
- heksagonalni (šestougaoni) - najčešće korišćeni oblik, predstavlja teorijski model koji najbolje opisuje realnost MCN-e, slika 2.1c



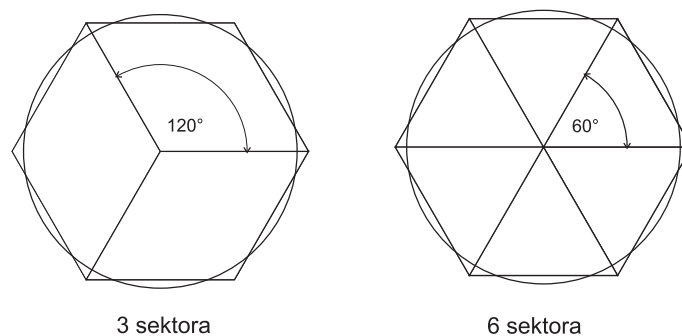
Slika 2.1: Geometrijski oblici predstavljanja MCN-e

Oblik ćelije se određuje na osnovu merenja terena ili u zavisnosti od pretpostavljenog modela prostiranja. Najprirodniji oblik za prikaz ćelije je krug, međutim u tom slučaju dolazi do preklapanja između oblasti susednih krugova (susednih ćelija). Analizirani su oblici koji pokrivaju oblast bez preklapanja kao što su: kvadrat, jednakostranični trougao i heksagon. Na osnovu sledećih činjenica kao geometrijski oblik za teorijsku pokrivenost izabran je heksagon. Heksagon (u odnosu na preostala dva oblika) formira najveću površinu od centra poligona do njegove najdalje ivice. Heksagon može sa najmanjim brojem ćelija da pokrije geografsku oblast predviđenu za MCN-u i oblik heksagona je sličan kružnom zračenju.

Ćelija je najčešće izdvojena na 3 (ugao od 120°) ili 6 (ugao od 60°) sektora, koji čine ukupnu oblast pokrivenosti ćelije, slika 2.2, [17].

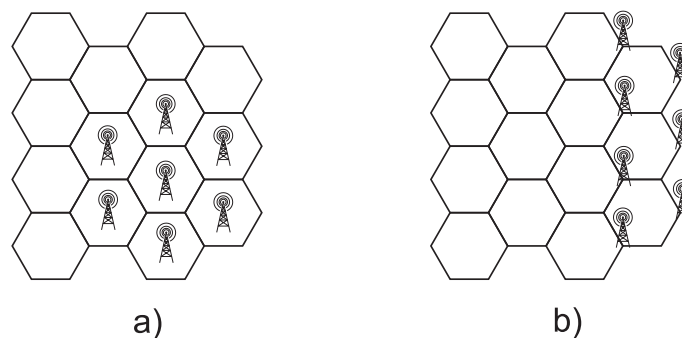
Položaj eNB-e u ćeliji heksagonalnog oblika može da bude [26]:

- u centru ćelije (Center-Excited Cells) - predstavlja standardan model položaja eNB-e u ćeliji heksagonalnog oblika, tj. jedna eNB-a pokriva površinu veličine jednog heksagona (u tom slučaju se na eNB-i koriste neusmerene antene), slika 2.3a
- u ćoškovima ćelije (Corner-Excited Cells) - predstavlja model položaja eNB-e u kome heksagoni nisu kompletne ćelije, već predstavljaju sektore.



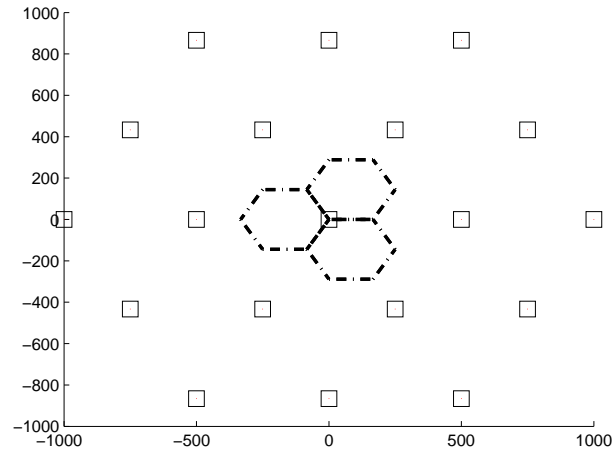
Slika 2.2: Sektori u okviru ćelije

Svaka eNB ima tri sektora oko sebe koji su heksagoni (u tom slučaju se na eNB-a koriste usmerene antene), slika 2.3b



Slika 2.3: Položaj eNB-e u MCN-i

Slika 2.4 predstavlja MCN-u od 19 makro eNB-a, koje su smeštene u ćoškovima ćelija na međusobnom rastojanju (Inter-Site Distance-ISD) od 500 m. Sektorizacija eNB-a data je na primeru centralne eNB-e koja je oivičena sa tri sektora (heksagona). Makro ćelije obezbeđuju pokrivenost na različitim rastojanjima zavisno od frekvencije i kapaciteta. Povećanje broja korisničkih uređaja (User Equipment, na dalje UE) uslovalo je pojavu ćelijskog koncepta čime je postignut veći kapacitet i oblast pokrivenosti. Ćelijski koncept predstavlja najznačajnije rešenje u MCN-a i zadovoljava zahteve UE-a za: kapacitetom uz minimalnu zauzetost spektra, fleksibilnost u pokrivanju oblasti



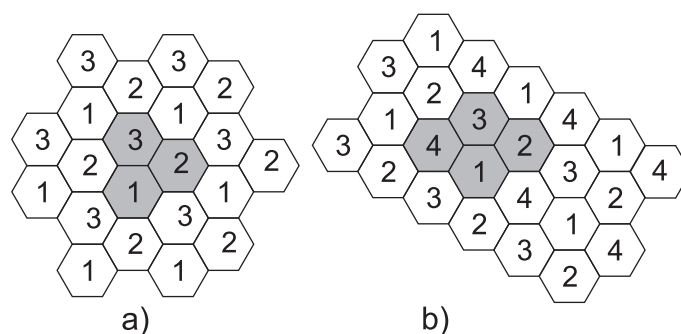
Slika 2.4: MCN od 19 makro eNB-a

različitih veličina i pristupačnu cenu [27]. Njegovom upotrebom dobijena je optimalna pokrivenost, ali je bilo nemoguće koristiti isti frekventijski kanal u susednim ćelijama MCN-e, jer je dolazilo do inter-ćelijske interferencije (Inter-Cell Interference-ICI). Upotreba istog frekventijskog kanala u ćelijama definiše se faktorom višestrukog korišćenja frekvencija (Frequency Reuse Factor). On se realizuje na osnovu frekvencije iz određenog skupa frekventijskih kanala koje se raspodeljuju eNB-a u zavisnosti od njihovog međusobnog rastojanja sa ciljem ograničavanja ICI. U slučaju da sve eNB-e iz iste klase koriste zajednički spektar reč je o full frequency reuse faktoru. Frekventijski spektar je ograničen za svaku MCN-u, usled čega je ograničen i broj UE-a koji se u njoj nalaze. Takođe, frekventijski spektar se sastoji od određenog broja frekventijskih kanala koji obuhvataju različit frekventijski opseg. Svakoј ćeliji se dodeljuje po jedna grupa frekventijskih kanala. Skup ćelija od kojih se u svakoј ćeliji (koja pripada tom skupu) koristi različita grupa frekventijskih kanala naziva se klaster, slika 2.5. Na taj način se cela površina koja obuhvata MCN-u deli na klaster, koji koriste istu grupu frekventijskih kanala (Co-Channel Reuse). Porastom protoka podataka, kako bi se zadržao željeni nivo protoka, neophodno je smanjiti površinu ćelije, zbog ograničenog broja kanala. Ukupan broj kanala C deli se na N skupova i tako se dobija faktor

višestrukog korišćenja frekvencija S [28]:

$$S = \frac{C}{N} \quad (2.1)$$

Parametri pomeraja definišu najbliže istokanalne susede (pridružuju se grupe



Slika 2.5: Izgled makro ćelijskog klastera za: a) $S = 3$ i b) $S = 4$

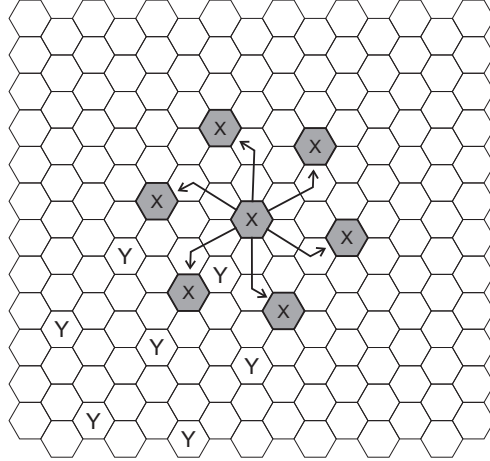
frekvencijskih kanala različitim ćelijama) na osnovu dva celobrojna parametra i i j gde je $i > j$. Postoji redosled od dva pravila koja su neophodna za pronalazak istokanalnih suseda i to [8] [28]:

1. pomeriti se i ćelija duž svakog od šest lanaca šestougona oko originalne ćelije
2. posle završenog koraka 1, pomeriti se j ćelija duž lanca ćelija za 60° u smeru suprotnom od smeru kazaljke na satu

Ponavljjanje grupe frekvencijskih kanala X oko originalne ćelije, ako su vrednosti parametara pomeraja $i = 2$ i $j = 1$, dato je na slici 2.6. Nastavak dodeljivanja grupa frekvencijskih kanala ćelijama, realizuje se odabirom druge grupe frekvencijskih kanala (Y grupa ćelija, slika 2.6), koji se takođe određuju na osnovu predhodno objašnjenih pravila. Kada se završi raspodela u okviru jednog klastera, postupak se ponavlja u celokupnoj oblasti koju pokriva ćelijska mreža.

Broj ćelija u klasteru N je glavni parametar prilikom projektovanja MCN-e i on definiše broj slobodnih kanala u svakoj ćeliji kao [17]:

$$N = i^2 + i \cdot j + j^2 \quad (2.2)$$



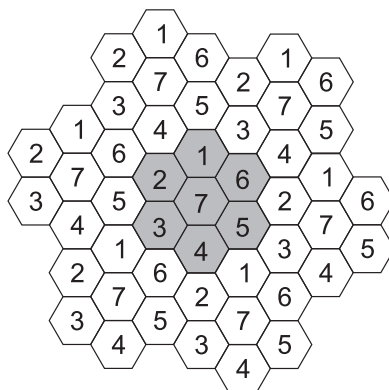
Slika 2.6: Raspodela grupe frekvencija za vrednost parametara pomeraja $i = 2$ i $j = 1$

gde i i j predstavljaju celobrojne parametre pomeraja. Na slici 2.7 nalazi se primer raspodele frekvencijskih kanala za klaster sa 7 ćelija.

Zavisnost rastojanja D (udaljenosti centara dve susedne ćelije), između svake ćelije koja koristi istu grupu frekvencijskih kanala (ko-kanalne ćelije) i poluprečnika ćelije r dato je kao:

$$D/r = \sqrt{3N} \quad (2.3)$$

gde $\sqrt{3N}$ predstavlja normalizovano rastojanje korišćenja iste grupe frekvencijskih kanala. U praksi, N se u klasteru određuje na osnovu ICI koja se opisuje kao odnos snaga signala i interferencija (SIR). SIR je odnos snaga korisnog signala (signal sa eNB-e koji je dodeljen UE-u) i ukupnih interferirajućih signala (signala sa interferirajućih eNB-a na kojima je dodeljen isti frekvencijski kanal). Porastom N , raste odnos D/r a takođe se povećava i odnos SIR, tako da uticaj interferencije opada. Suprotno tome, smanjenjem N uticaj interferencije raste. Tabela 2.1 predstavlja vrednosti za N i D/r na osnovu brojčanih primera i i j .



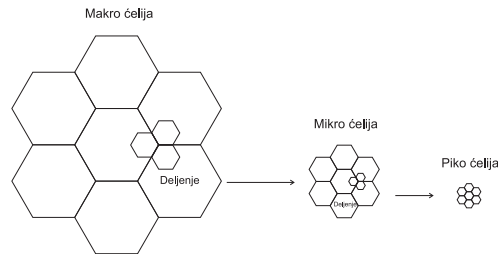
Slika 2.7: Raspodela frekvencijskih kanala (klaster sa 7 ćelija)

vrednosti i i j	veličina klastera (N)	$\sqrt{3N}$
$i = 1, j = 1$	3	3
$i = 1, j = 2$	7	4.58
$i = 0, j = 3$	9	5.20
$i = 2, j = 2$	12	6

Tabela 2.1: Veličina klastera N na osnovu pojedinih vrednosti i i j (preuzeto iz [8]).

2.1.2 Podela ćelije u MCN

Podela ćelije u MCN-i podrazumeva podelu jedne velike ćelije na manje podćelije. Manja ćelija nastaje podelom rastojanja D , pri čemu se površina ćelije smanjuje a digitalni protok podataka (na dalje samo protok podataka) povećava. Kada se ćelija deli na manje ćelije, eNB-e se u okviru novih ćelija najčešće nalaze na polovini rastojanja između postojećih, čime nastaju nove ćelije koje su četiri puta manje od polaznih [8]. Na taj način su formirane dve heksagonalne strukture, slika 2.8. Preuzimanje UE-a, prilikom njegovog napuštanja oblasti eNB-e, od strane susedne eNB-e naziva se handover. Povećavanjem broja manjih ćelija raste i broj handover-a, čime se dodatno opterećuje sistem.



Slika 2.8: Podsektorizacija ćelije

2.2 Heterogene ćelijske mreže

HetNet, jeste slojevita RAN (Radio Access Network) radio pristupna mreža. Ovakvim pristupom HetNets mogu biti kombinacija RAN tehnologija sa UMTS, CDMA i LTE, tako da rade zajedno sa Wi-Fi mrežama i formiraju višeslojne HetNets. Strukturu homogene MCN-e čine makro eNB-e, gde je pažljivo planirana lokacija za svaku od njih, tako da je topologija mreže konfigurisana za maksimalnu pokrivenost signalom. Ovakav način realizacije neće efikasno zadovoljiti potrebu povećanja kapaciteta i pokrivenosti. Povećanje kapaciteta u ovim mrežama može se postići razdvajanjem ćelija ili dodavanjem nosilaca postojećoj mreži. Dakle, potreban je novi pristup celoj arhitekturi mreže na bazi malih ćelija (tabela 2.2) i to je razlog zbog čega su HetNets toliko važne za budućnost mobilne bežične industrije [9]. U ovoj strategiji, makro eNB-e se koriste da pruže pokrivenost, s druge strane uvode se eNB-e male snage (mikro, piko i femto) da eliminišu nepokrivene površine i istovremeno povećaju kapacitet sistema na mestima gde je to potrebno. Mikro, piko i femto eNB-e mogu se lako rasporediti unutar postojeće makro mreže i to:

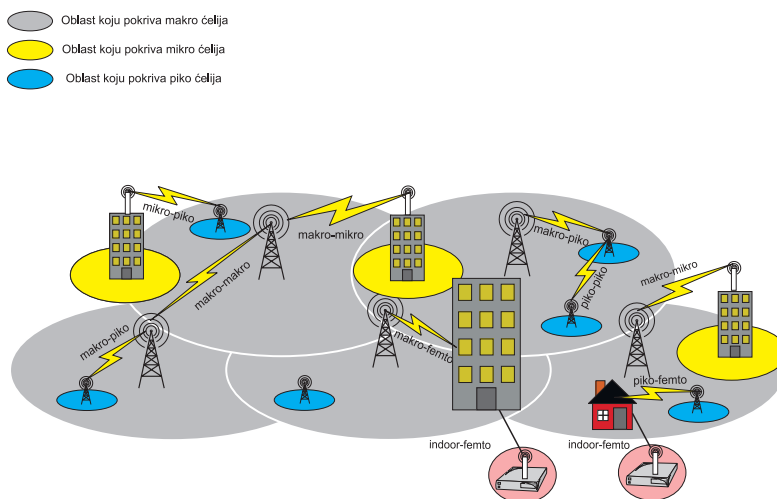
- mikro ćelije za spoljašnju upotrebu
- piko ćelije za unutrašnju upotrebu (veći objekti-preduzeća)
- femto ćelije za unutrašnju upotrebu (manji objekti-stambeni)

Mogućnost samopodešavanja malih eNB-a obezbeđuje smanjenje troškova njihovog raspoređivanja. Ove male eNB-e najčešće koriste instalacije koje su već sastavni deo objekta u koji trebaju biti postavljene. Osim toga, ćelijske

veličina ćelije	poluprečnik ćelije	snaga bazne stanice
Makro (outdoor)	>300m	46dBm
Mikro (outdoor)	100-300m	40dBm
Piko (outdoor/indoor)	<200	>24dBm
Femto (indoor)	10-25m	<20dBm

Tabela 2.2: Parametri makro, mikro, piko i femto ćelija (preuzeto iz [9])

HetNets pružaju mogućnost optimizacije ukupnih troškova mrežnih usluga [9], [29]. Tipičan primer HetNets prikazan je na slici, 2.9.



Slika 2.9: Heterogena ćelijska mreža

Ovakav pristup vidi se kao najperspektivnije rešenje koje može obezbediti veliki skok performansi za povećanje efikasnosti spektra i njegovu ponovnu prostornu upotrebu. Tako na primer, femto eNB-e mogu obezbediti pokrivanje nepokrivenih manjih oblasti ili koristiti spektar koji već koriste makro eNB-e [30]. Raspodela spektra može se vršiti na taj način da različite klase eNB-a dobijaju ortogonalne delove spektra, tako da ne postoji inerferencija između njih. Takođe, zbog uštede frekvencijskih resursa, moguće je da više različitih klasa bude alocirano u isti spektar, gde postoji ICI između njih [9]. Koncept ćelijskih HetNets predložen je u okviru LTE-A tehnologije kako bih se pove-

ćala spektralna efikasnost [31]. Jedan od glavnih problema ćelijskih HetNets je ICI, koji je potrebno rešavati tehnikama uklanjanja ICI [32]. 3GPP kontinualno pronalazi nova rešenja da se izbori sa ovim problemima oslanjajući se na sinhronizaciju između istih nivoa ćelija (npr. samo piko), kao i između različitih nivoa ćelija (npr. između makro i piko) [33], [34].

2.3 Poisson-ov proces generisanja tačaka

2.3.1 Proces generisanja tačaka (Point Process)

Proces generisanja tačaka (*PP*) je slučajan proces raspodele tačaka u prostoru. Kontinualan višedimenzionalan prostor koji razmatramo naziva se Euklidov (Euclidian space- E) R^d . U slučaju od interesa, E je R^2 , odnosno E je površina po kojoj raspodeljujemo tačke (x i y koordinate eNB-e). Mi možemo da posmatramo razne površine (krugove, kvadrate, itd.) nad tim skupom E . Površine nas zanimaju iz razloga jer želimo da znamo broj tačaka (broj eNB-a) koje se nalazi u okviru njihovih granica. Skup svih mogućih takvih površina je Borelov prostor (Borel space- B), tj. $B \subset R^2$. Definiše se mera Φ kao diskretna suma Dirakovih (Dirac) impulsa nad prostorom E :

$$\Phi = \sum_i \delta_{X_i} \quad (2.4)$$

gde je X_i slučajna promenljiva.

Mera Φ daje informaciju koliki broj eNB-a se nalazi u slučajno izabranoj površini B . Odnosno, Φ vrši mapiranje gde X_i predstavlja slučajno izabrane koordinate eNB-e i njoj se dodeljuje Dirakov impuls [35], [36]. Proces generisanja tačaka nad Euclidean-ovim prostorom R^d može biti:

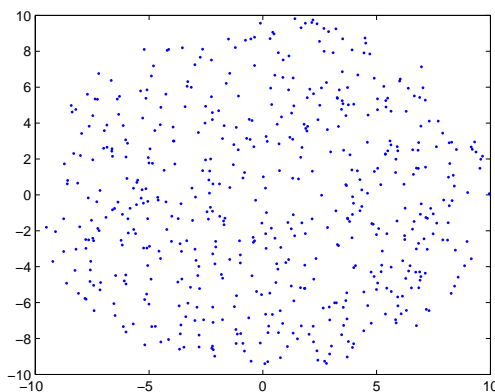
- prost, odnosno ne postoje dve tačke na istoj lokaciji
- stacionaran-važi ako je zakon procesa generisanja tačaka nepromenljiv u odnosu na pomeranje
- Poisson-ov
- izotropan-važi ako je zakon procesa generisanja tačaka nepromenljiv u odnosu na rotaciju

- označen-podrazumeva dodelu oznake tačkama procesa gde su oznake obično nezavisne od procesa generisanja tačaka [35].

2.3.1. DEFINICIJA. *Poisson-ov proces generisanja tačaka (Poisson point process-PPP) sa uniformnim intenzitetom $\lambda > 0$ je proces generisanja tačaka u prostoru R^2 i prema [37]:*

1. *Za svaki ograničen zatvoreni skup P , broj tačaka $N(P)=\Phi(P)$ ima Poisson-ovu raspodelu koja se zapisuje kao: $\lambda \cdot |P|$, gde $|P|$ označava oblast P*
2. *Ako su P_1, \dots, P_m disjunktni regioni, onda su $N(P_1), \dots, N(P_m)$ nezavisne slučajne promenjive*

Iz ove definicije sledi svojstvo: ako je dat skup $N(P) = n$, onda je n tačaka uniformno i nezavisno raspodeljeno u P . Ovaj proces generisanja tačaka je dobar kod modela gde je potreban nezavisan i potpuno slučajan izbor (npr. lokacija, korisnika...) [36], slika 2.10 (primer PPP modela na kružnici). Detalji



Slika 2.10: Poisson-ov proces za $\lambda = 4$

vezani za proces generisanja tačaka i Poisson-ov proces generisanja tačaka prema [36] i [38] mogu se naći u [35], [37], [39], [40], [41], [42].

2.3.2 Voronoi dijagrami

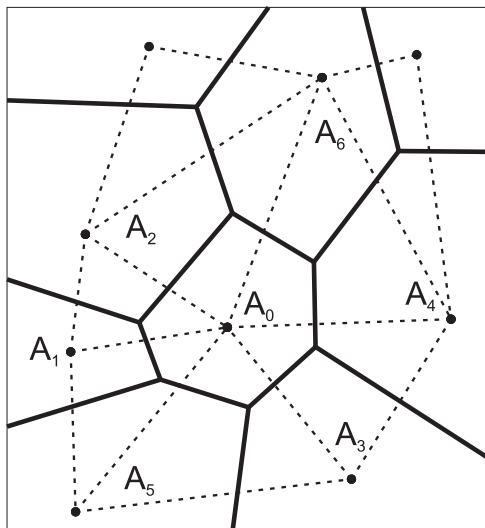
Voronoi dijagrami (Voronoi tessellations) su korisni u rešavanju primenjenih i teorijskih problema u različitim disciplinama uključujući astrofiziku, biologiju, geografiju, ekologiju, industrijski inženjering i seizmologiju. U [43] dati su primeri iz ovih i mnogih drugih disciplina, kao i istorija Voronoi dijagrama. Neka je dat skup tačaka $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, onda je Voronoi dijagram $T = \{C_{p_1}, C_{p_2}, \dots, C_{p_n}\}$ skup ćelija takvih da svaka lokacija, $y \in C_{p_i}$, je najbliža tački p_i od bilo koje druge tačke iz skupa P [44]. Jednačina po C_{p_i} glasi:

$$C_{p_i} = \{y \in R^d : \|y - p_i\| \leq \|y - p_j\| \text{ za } i, j \in 1, \dots, n\} \quad (2.5)$$

Voronoi dijagram je poseban slučaj prostornog dijagrama, gde je dat skup centara, tj. prostor je podeljen u skladu sa "prostornim uticajem" [43]. Jedan od načina realizacije Voronoi dijagrama je po metodu normalnih simetrala (the Perpendicular Bisectors Method [43], [45]). Realizacija Voronoi dijagrama počinje iz središnje tačke (tačka A_0 , slika 3.8) i pronalazi se tačka koja je najbliža tački A_0 a to je A_1 . Deo normale na središnju duž A_0A_1 formiraće prvu ivicu A_0 Voronoi poligona. Zatim, druga najbliža tačka centra tački A_0 je A_2 i normala na simetralu duži A_0A_2 formiraće drugu ivicu A_0 Voronoi poligona. Ova algoritam se ponavlja sa trećom (A_3), četvrtom (A_4), petom (A_5) i šestom (A_6) tačkom centra, dok normale simetrala na duži A_0A_3 , A_0A_4 , A_0A_5 , $A_0A_6 \dots$ ne zatvore pravilan poligon koji se ne menja i posle analize više udaljenih tačaka. Navedeni algoritam se ponavlja za sve tačke Voronoi dijagrama u celom prostoru, dok se ne dobije izgled kao na slici 2.11. Voronoi dijagrami čiji su centri slučajno i nezavisno raspodeljeni nazivaju se Poisson-Voronoi dijagrami. Oni su korisni za modelovanje i opisivanje različitih prirodnih uzoraka kao i generisanje slučajnih mrežastih struktura [46].

2.3.3 Raspodela baznih stanica Poisson-ovim procesom

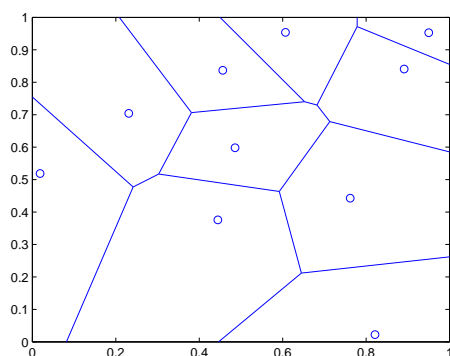
Polazeći od poznate činjenice da je analiza klasične heksagonalne arhitekture MCN-e složena [47], koriste se pojednostavljeni (analitički) ili empirijski (zasnovani na složenim simulacijama) modeli sistema. Struktura MCN-e postaje sve složenija uvođenjem različitih vrsta eNB-a (mikro, piko, femto), tj. HetNets-a, u strukturu mreže. Poslednjih godina dat je značajan akcenat na



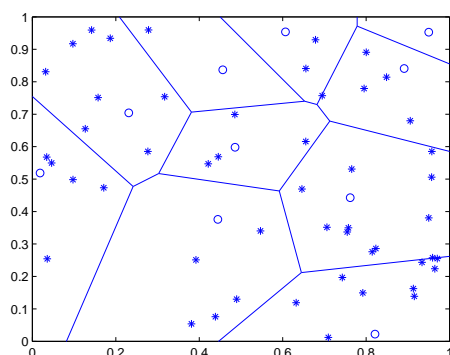
Slika 2.11: Realizacija Voronoi poligona

slučajnoj raspodeli eNB-a u okviru MCN-e koji se dobro opisuje i analizira alatima stohastičke geometrije (Stochastic Geometry) i olakšava analiza verovatnoće pokrivenosti (Coverage Probability) [48]. Ovakav pristup omogućava jednostavan analitički model koji se samim tim i simulaciono veoma lako realizuje. U radovima [49], [50] autori predstavljaju MCN-u (za downlink vezu) sa K nivoa, gde $K = 1, 2, \dots, n$. Kada je $K = 1$ radi se o MCN-i koja sadrži samo makro eNB-e. U slučaju $K = 2$ na makro strukturu se dodaje još jedan (ili $K > 2$) više nivoa (mikro, piko ili femto eNB), čineći tako HetNets. Svaka vrsta eNB-e raspodeljena je po PPP raspodeli i ima različitu predajnu snagu, protok podataka i gustinu. Gustina eNB-e (λ) računa se kao prosečan broj eNB-a po jedinici površine. Grafički prikaz slučajne raspodele eNB-a realizovan je uz pomoć Voronoi dijagrama. Slika 2.12 predstavlja raspodelu eNB-a za $K = 1$ mobilnu ćelijsku strukturu, gde su pozicije eNB-e tačke u centrima poligona. Slika 2.13 predstavlja raspodelu eNB-a za $K = 2$ mobilnu ćelijsku strukturu, gde krugovi čine pozicije makro eNB-e (prvi nivo) a oznaka zvezde čini pozicije piko ili femto eNB-e (drugi nivo). Takođe, autori u radu [51] su analizirali veličinu oblasti koje pokrivaju eNB-e raspodeljene po PPP. Na osnovu zadate gustine PPP (tj. za prosečan broj tačaka po jedinici površine)

dobija se raspodela veličina tih površina.



Slika 2.12: Raspodela eNB-a Poisson-ovim procesom za $K = 1$



Slika 2.13: Raspodela eNB-a Poisson-ovim procesom za $K = 2$

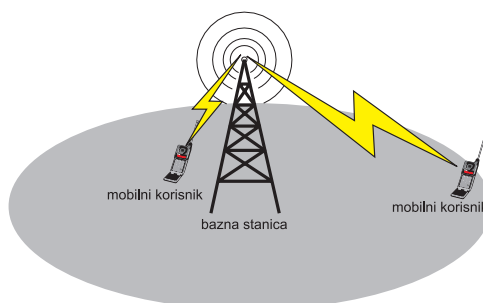
Glava 3

Modelovanje mobilne bežične mreže

U odnosu na prethodno poglavlje, koje analizira arhitekturu eNB-a tj. mesto predaje sadržaja, MCN-i potreban je i prijemnik (krajnji korisnik usluge) kome se isporučuje sadržaj. Samim tim, neophodno je uspostaviti pouzdanu vezu (link) između njih. Veza se ostvaruje prenosom signala od mesta predaje do mesta prijema. Iz tog razloga, ovo poglavlje bavi se teorijskim osnovama i glavnim karakteristikama prenosa signala od eNB-e do krajnjeg korisnika. Signal se prostire kroz slobodan prostor ili u unutrašnjosti objekata i na osnovu toga, biće predstavljeni različiti modeli prostiranja signala.

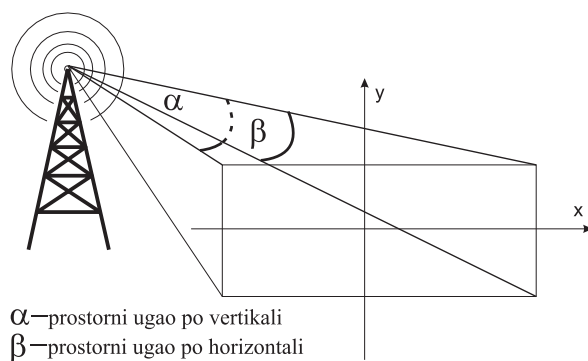
3.1 Korisnik u mobilnoj bežičnoj mreži

Raspodela eNB-a definisana je odgovarajućom arhitekturom MCN-e. Izborom pogodne arhitekture, eNB teži da što bolje obezbedi pokrivenost signalom oblast za koju je predviđena. Adekvatna pokrivenost od strane eNB-e omogućava kvalitetan signal na UE-u (npr. mobilni telefon), bilo da se nalazi na manjoj ili većoj udaljenosti od eNB-e, slika 3.1. Meru kvaliteta signala daje



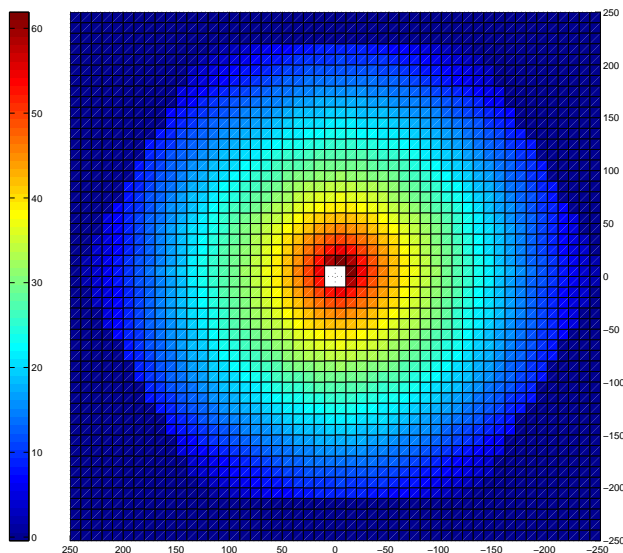
Slika 3.1: Pozicija korisnika u oblasti bazne stanice

odnos signal-šum (Signal-to-Noise Ratio-SNR) na mestu prijema (tj. UE-a). Odnos SNR predstavlja jednu od najčešćih i najbolje razumevanih karakteristika koje opisuju osobine digitalnog komunikacionog sistema. Od nekoliko mera koje postoje, SNR se obično najlakše procenjuje i služi kao odličan pokazatelj pouzdanosti sistema. Naziv “šum” u kontekstu SNR predstavlja termalni šum na ulazu u prijemnik. Međutim, kada su u pitanju komunikacioni sistemi prihvatljivija je mera prosečan SNR (average SNR) gde se reč “prosečan” odnosi na statistički prosek (detaljnije u 3.2.4). Tako SNR predstavlja odnos prosečne snage signala po simbolu i snage šuma po simbolu uprosečeno po vremenu u frekvencijskom opsegu (kanalu) u kojem se vrši prenos [52]. UE zahteva određenu minimalnu vrednost SNR na prijemu, kako bi mogao primiti podatke od eNB-e. Samim tim, ako je ostvaren minimalan SNR u čitavoj oblasti koju pokriva eNB-a (tj. u MCN-i koju čini sistem eNB-a), smatra se da arhitektura mreže uspešno pokriva oblast za koju je predviđena. Narednih nekoliko slika predstavlja grafički prikaz vrednosti SNR na prijemu u zavisnosti od: udaljenosti UE-a od eNB-e i tilt-a (ugao zakrivljenosti antene po horizontalnom i vertikalnom pravcu, slika 3.2). UE-i su raspodeljeni po odgovarajućoj površini na međusobnom ekvidistantnom rastojanju.



Slika 3.2: Tilt-ugao zakrivljenosti antene po horizontalnom i vertikalnom pravcu

Slika 3.3 predstavlja najjednostavniji model gde se dijagram zračenja sektorske antene aproksimira omnidirekcionom antenom (eNB je u centru heksagona), dok je slika 3.4 precizan model gde je uključena i sektorizacija antene

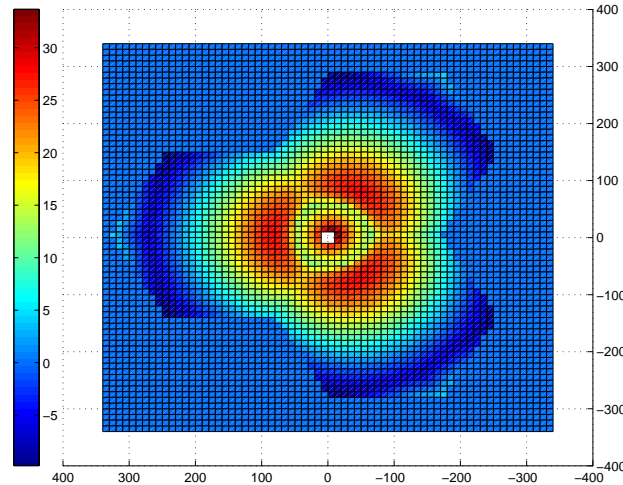


Slika 3.3: UE-v SNR (jedan heksagon) bez tilta

i vertikalni tilt (eNB je u uglu tri sektora).

3.2 Modelovanje prostiranja signala u mobilnim bežičnim mrežama

MCN-a predstavlja ozbiljan izazov kao sistem za pouzdanu komunikaciju velikim protokom. U odnosu na žičane mreže koje su stacionarne, MCN-a su nestacionarne (sa slučajnim karakteristikama) i na taj način su složene za analizu. Modelovanje MCN-e je proces koji se zasniva na zakonima teorije verovatnoće i rezultatima merenja dobijenim na određenom sistemu i frekventnom opsegu. Path loss, slabljenje signala usled prenosa, između predajnika (eNB-e) i prijemnika (UE-a) predstavlja osnovnu komponentu modela kanala koja se zahteva za analizu MCN-e. Koriste se različiti modeli za predikciju (pretpostavku) slabljenja koje se očekuje između eNB-e i UE-a unutar zone pokrivenosti MCN-e. MCN-a nije samo osetljiva na šum, već i na smetnje koje

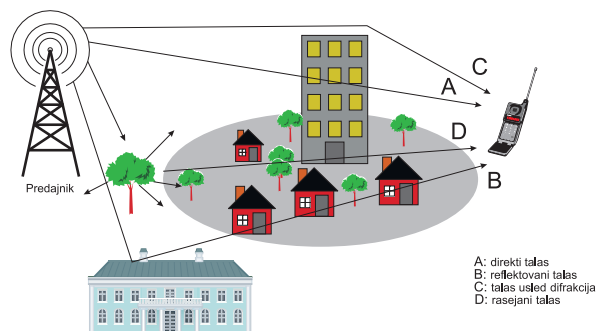


Slika 3.4: UE-v SNR (tri sektora) sa tiltom

se menjaju tokom vremena na nepredvidiv način zbog kretanja UE-a. Signal se na svom putu od predajnika do prijemnika u MCN-i prostire linijom direktne vidljivosti (Line-of-Sight-LOS) ukoliko postoji i linijom indirektno vidljivosti (Non-Line-of-Sight-NLOS) u prisustvu velikog broja različitih prepreka. Slabljenje snage signala izazivaju prepreke između predajnika i prijemnika i čine efekte u obliku:

- refleksije (veličina objekta je veća u odnosu na talasnu dužinu signala)
- rasejanja (veličina objekta je manja u odnosu na talasnu dužinu signala)
- difrakcije (kada signal naiđe na ivicu objekta koji je na putanji, slično je refleksiji), slika 3.5 [8], [53]

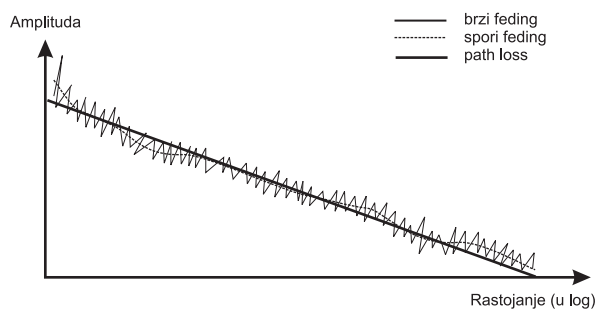
Shadowing je slabljenje signala usled prepreka koje se nalaze na direktnoj putanji i koje smanjuju prijemnu snagu direktne komponente. Path loss i efekti prostiranja duž kanala predstavljaju rasipanje snage talasa signala koju zrači predajnik. Efekat promene amplitude i faze signala koji se prostire u MCN-i, gde direktni talasi i talasi koji stižu sa izvesnim kašnjenjem nisu u istoj fazi, naziva se fading (fading). Postoje dve vrste fadinga:



Slika 3.5: Efekti prostiranja

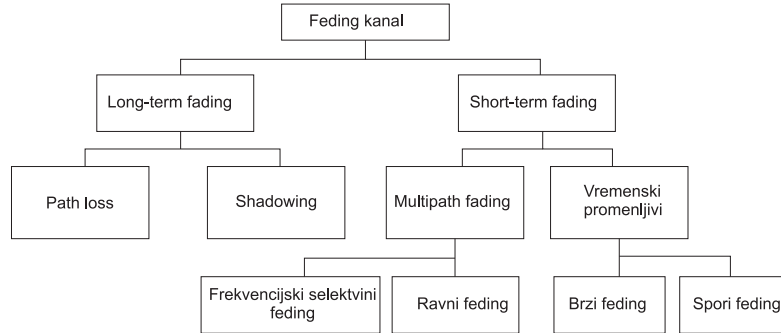
1. short-term fading-(brze promene anvelope prijemne snage, mogu se videti u slučaju kratkih udaljenosti ili u kraćim vremenskim intervalima)
2. long-term fading-(spore promene anvelope prijemne snage, mogu se videti u slučaju velikih udaljenosti ili dužim vremenskim intervalima)

Statistika long-term fedinga je log-normalna pa je poznat pod nazivom log-normalni feding ili shadowing, dok se short-term feding naziva i multipath feding [54]. Slika 3.6 ilustruje promene amplitude signala pod uticajem brzog i sporog fedinga u odnosu na rastojanje, a slika 3.7 predstavlja blok dijagram klasifikacije feding kanala.



Slika 3.6: Ilustracija brzog i sporog fedinga

Multipath takođe prouzrokuje: Doplerov efekat (Doppler shift), širenje signala usled kašnjenja (Delay spread) i intersimbolsku interferenciju (Inter-

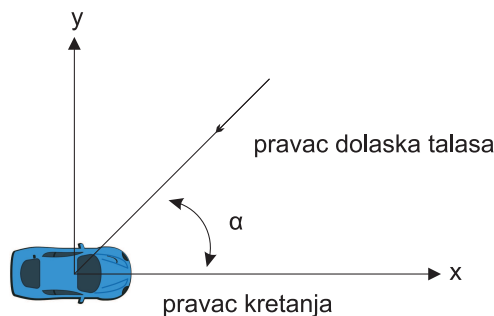


Slika 3.7: Klasifikacija feding kanala (preuzeto iz [1])

Symbol Interference-ISI). Doplerov efekat (jednačina (3.1), slika 3.8) predstavlja promenu frekvencije f_d koja nastaje usled promene položaja UE-a.

$$f_d = \frac{v \cdot \cos(\alpha) \cdot f_c}{c} \quad (3.1)$$

gde v predstavlja brzinu UE-a, f_c frekvenciju nosioca i c brzinu svetlosti ($3 \cdot 10^8 \text{m/s}$).



Slika 3.8: Doplerov efekat

Širenje signala usled kašnjenja javlja se jer talasi signala stižu do prijemnika sa određenim vremenskim pomerajem (kašnjenjem) i prema [55] se računa:

$$\text{multipath spread} = (\text{najduža putanja} - \text{najkraća putanja}) / c$$

ISI predstavlja pojavu kada deo snage sa jednog impulsa signala prelazi na drugi zbog međusobnih preklapanja signala koji stižu do prijemnika usled multipath-a.

Modeli se po načinu pristupa prostiranju mogu svrstati u dve velike grupe:

1. empirijski (statistički) - su modeli koji se zasnivaju na velikom broju merenja (frekvencije, prikupljanja podataka o terenu itd.)
2. deterministički - su zapravo fizički modeli koji uzimaju u obzir realnu situaciju na terenu i koriste kompleksne analitičke ili numeričke metode

3.2.1 Prenos signala kroz slobodan prostor

Najjednostavniji model prostiranja signala jeste prostiranje u slobodnom prostoru. Signal se kreće između dve tačke, od predajnika do prijemnika (međusobno rastojanje d), bez slabljenja ili refleksije, primenjujući zakon prostiranja u slobodnom prostoru. Pretpostavljamo da se signal prostire kao LOS i Friis-ova formula [56] ima oblik:

$$P_R(d) = P_T \cdot \left(\frac{G\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3.2)$$

gde je G dobitak predajne i prijemne antene. Snaga primljenog signala proporcionalna je kvadratu talasne dužine λ , a opada obrnuto proporcionalno sa kvadratom rastojanja d . U formuli $\lambda = c/f_c$ (c je brzina svetlosti u vakuumu, f_c frekvencija nosioca), kada frekvencija nosioca raste, snaga prijemnog signala opada. Path loss se može izraziti u dBm kao [10]:

$$P_L(d) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_t}{P_r} \right) \quad (3.3)$$

gde je:

$$X [dB] = 10 \log_{10}(X) \quad (3.4)$$

uzimajući u obzir pretpostavku da antene imaju jedinični dobitak, path loss u slobodnom prostoru može se predstaviti kao:

$$P_L = -20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (3.5)$$

Za $\lambda = c/f_c$ (f_c je u [MHz] a d u [km]), jednačina (3.5) može se napisati kao:

$$P_L = 32.44 + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(d). \quad (3.6)$$

sredina	γ vrednost
urbana makro	3.7 – 6.5
urbana mikro	2.7 – 3.5
zgrada (jedan sprat)	1.6 – 3.5
zgrada (više spratova)	2 – 6
međusprat	1.8 – 2.2
fabrika	1.6 – 3.3
kuća	3

Tabela 3.1: Path loss eksponent za različite unutrašnje i spoljašnje sredine (preuzeto iz [10]).

Jednostavane modele najbolje je koristiti za analizu raznih vrsta sistema jer obuhvataju suštinu prostiranja signala bez primene složenih path loss modela, koji detaljnije opisuju realan kanal. Model opisan jednačinom (3.7) predstavlja pojednostavljen model path loss u funkciji rastojanja:

$$P_R(d) = K \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^\gamma \quad (3.7)$$

gde je d_0 -je referentno rastojanje (za indoor je 1 – 10 m a outdoor 10 – 100 m), γ -path loss eksponent, K -path loss konstanta i njegova vrednost iznosi:

$$K = \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0}\right)^2 \quad (3.8)$$

Vrednosti γ za različite unutrašnje i spoljašnje sredine predstavljeni su u tabeli 3.1.

3.2.2 Empirijsko (statističko) modelovanje u mobilnim bežičnim mrežama

Brojni empirijski path loss modeli razvijani su godinama i karakteriše ih veliki broj merenja. Ovi modeli su uglavnom zasnovani na empirijskim merenjima pri određenom rastojanju, frekventnom opsegu i na određenom geografskom području ili objektu. Značajna prednost empirijskih modela je u tome, jer mogu u velikoj meri modifikovati prostiranje u pojedinim lokacijama. Odnosno, oni su u stanju da opišu faktore kao što su neobično velike zgrade ili

brda. Međutim, empirijski modeli su jednostavniji ali nisu pogodni za primenu u gusto naseljenih sredinama (gde ima mnogo prepreka i reflektujućih površina). Osnovni nedostaci empirijskih modela prema [25] su:

- koriste se samo u određenom frekvencijskom opsegu i tako su uključeni u originalna merenja
- oblasti moraju biti subjektivno klasifikovane prema kategorijama (npr. urbana oblast), koja ima drugačije značenje u različitim zemljama sveta
- modeli ne pružaju nikakav fizički uvid u mehanizme po kojima nastaje prostiranje

Ipak, mnogi bežični sistemi koriste empirijske modele kao osnovu za analizu [8]. Poznatiji modeli koji su zastupljeni za modelovanje makro-ćelijskih oblasti i relevantni kod praktičnog projektovanja sistema su: Okumura-Hata, COST 231-prošireni Hata i 3GPP standardizovani modeli.

Okumura-Hata model

Primenjuje se za frekventne opsege od 150–1500 MHz. eNB je na visinama (h_b) od 30 – 200 m, mobilna stanica (h_m) od 1 – 10 m i rastojanje između predajnika i prijemnika (d) je u opsegu od 1 – 10 km. Standardne empirijske formule za path loss po Okumura-Hata modelu su:

za urbanu oblast:

$$L_{dB} = A + B \cdot 10 \cdot \log_{10}(d) - E \quad (3.9)$$

za suburbanu oblast:

$$L_{dB} = A + B \cdot 10 \cdot \log_{10}(d) - C \quad (3.10)$$

za ruralnu oblast:

$$L_{dB} = A + B \cdot 10 \cdot \log_{10}(d) - D \quad (3.11)$$

gde su vrednosti A, B, C, D i E date kao:

$$A = 69.55 + 26.16 \cdot \log_{10}(f_c) - 13.82 \cdot \log_{10}(h_b)$$

$$B = 44.9 - 6.55 \cdot \log_{10}(h_b)$$

$$C = 2 \left(\log_{10}\left(\frac{f_c}{28}\right) \right)^2 + 5.4$$

$$D = 4.78 \cdot \log_{10}(f_c)^2 + 18.33 \cdot \log_{10}(f_c) + 40.94$$

$$E = 3.2((\log_{10}(11.7554h_m))^2 - 4.97 \text{ za velike gradove, } f_c \geq 300\text{MHz}$$

$$E = 8.29((\log_{10}(1.54h_m))^2 - 1.1 \text{ za velike gradove, } f_c \leq 300\text{MHz}$$

$$E = (1.1\log_{10}(f_c) - 0.7)h_m - (1.56\log_{10}(f_c) - 0.8) \text{ za srednje i male gradove}$$

Iako su ove formule aproksimacije, danas se uglavnom koriste umesto Okumurinih krivih. Aproksimacije predstavljaju dobar model za prvu generaciju MCN-a, ali ne i za dobro modelovanje prostiranja u ćelijskim sistemima sa manjim veličinama ćelija i većim frekvencijskim opsegom [56], [57].

COST 231-prošireni Hata Model

Hata model je proširen od strane Evropske organizacije za naučna i tehnička istraživanja (EVRO-COST) za opseg frekvencija od 1.5 – 2 GHz. Jednačina za COST 231 ima izgled kao:

$$L_{dB} = F + B \cdot 10 \cdot \log_{10}(d) - E + G, \text{ gde je} \quad (3.12)$$

$$F = 46.3 + 33.9 \cdot \log_{10}(f_c) - 13.82 \cdot \log_{10}(h_b)$$

gde B , E , d imaju iste vrednosti kao u Okumura-Hata modelu a $G = 0$ dB za gradove srednje veličine i suburbane oblasti a 3 dB za metropole [56], [57], [58].

COST 231- Walfish-Ikegami (W-I) model

Model se upotrebljava za urbana i suburbana područja, makro-ćelijske oblasti, gde je približno ista visina objekata (zgrada, kuća). eNB je na visinama od 4–50 m, a mobilna stanica od 1–3 m. Rastojanje između predajnika i prijemnika je u opsegu od 0.02–5 km a primenjuje se za frekvencijske opsege od 800–2000 MHz. Karakteristika urbane sredine je opisana sa parametrima: visinom zgrade (h_{roof}), širinom ulice (w) i rastojanjem između zgrada (b). COST 231- W-I model opisan je jednačinama (3.13 i 3.14) za dva slučaja LOS i NLOS:

$$L_{LOS}[dB] = 42.6 + 26\log_{10}(d[km]) + 20\log_{10}(f[MHz]), \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned}
L_{NLOS} &= L_{FS} + L_{rts}(w_r, f, \Delta h_m, \Phi) + \\
&+ L_{MSD}(\Delta h_b, h_b, d, f, b_s)
\end{aligned} \tag{3.14}$$

gde je L_{FS} gubitak usled prostiranja kroz slobodan prostor, L_{rts} gubitak usled prostiranja koji zavisi od visine objekata u ulicama a L_{MSD} su višestruki gubici usled difrakcije čiji su parametri dati kao:

$$\begin{aligned}
L_{FS} &= 32.4 + 20 \cdot \log_{10}(d[km]) + 20 \cdot \log_{10}(f[MHz]) \\
L_{rts} &= -8.8 + 10 \cdot \log_{10}(f[MHz]) + 20 \cdot \log_{10}(\Delta h_m[m]) - \\
&- 10 \cdot \log_{10}(w[m]) + L_{ori} \\
L_{ori} &= -10 + 0.35\Phi, \quad 0 \leq \Phi \leq 35^\circ \\
L_{ori} &= 2.5 + 0.075(\Phi - 35), \quad 35^\circ \leq \Phi \leq 55^\circ
\end{aligned}$$

$$L_{MSD} = L_{bsh} + k_a + k_d \cdot \log_{10}(d[km]) + k_f \cdot \log_{10}(f[MHz]) - 9 \cdot \log_{10}(b)$$

gde je

$$\begin{aligned}
L_{bsh} &= -18 \cdot \log_{10}(1 + \Delta h_b), \quad za \ h_b > h_{roof} \\
L_{bsh} &= 0, \quad za \ h_b < h_{roof}
\end{aligned}$$

Parametri k_a , k_d , k_f , mogu se naći u [58], [59].

3GPP modeli za prostiranje

3GPP u okviru svojih projekata koristi mnoštvo različitih modelovanja jednačina path loss-a za: makro ćelijske sisteme jednačina (3.15) [60], mikro ćelijske sisteme jednačina (3.16) [60] i piko ćelijske sisteme jednačina (3.17) [61]:

$$\begin{aligned}
PL_{LOS}(d) &= 103.4 + 24.2 \cdot \log_{10}(d), \\
PL_{NLOS}(d) &= 131.1 + 42.8 \cdot \log_{10}(d)
\end{aligned} \tag{3.15}$$

$$\begin{aligned}
PL_{LOS}(d) &= 103.8 + 20.9 \cdot \log_{10}(d), \\
PL_{NLOS}(d) &= 145.4 + 37.5 \cdot \log_{10}(d)
\end{aligned} \tag{3.16}$$

/

$$L = 38 + 30 \cdot \log_{10}(d), \tag{3.17}$$

gde je d u metrima.

Modelovanje prostiranja u unutrašnjosti objekata

Značajan uticaj na path loss u unutrašnjosti objekata imaju: prostorije, hodnici, materijal zidova i podova. Jednačina path loss-a ima oblik:

$$P_L(d) = P_d + 20 \cdot \log_{10}(d) + n_f \cdot a_f + n_w \cdot a_w \quad (3.18)$$

gde je P_d path loss na referentnom rastojanju ($d = 1\text{m}$) od predajnika, n_f je broj podova kroz koje signal prolazi, a_f je slabljenje koje unosi jedan pod, n_w je broj zidova kroz koje signal prolazi, a_w je slabljenje koje unosi jedan zid.

3.2.3 Determinističko (fizičko) modelovanje u mobilnim bežičnim mrežama

Model Ray Tracing (two-ray)

Najopštiji Ray Tracing model uključuje sve efekte multipath-a i pretpostavlja konačan broj odbijanja sa poznatih površi. Efekti odbijanja, prelamanja i rasejanje talasa predstavljaju se pomoću jednostavnih geometrijskih jednačina, umesto složenih Maksvelovih talasnih jednačina. Ray Tracing model u velikoj meri zavisi od geometrije i dielektričnih svojstava sredine kroz koju se prostire signal. Efekti prostiranja zasnovani na promeni prijemne snage, kao što je kašnjenje usled širenja kod multipath-a, nisu uvek dobro opisani sa ray tracing tehnikama [56], [62]. Two-ray model se koristi u slučaju višestrukog prostiranja, kada je jedan odbijeni talasni zrak od površinu zemlje dominantan, slika 3.9. Signal na prijemu se sastoji od dve komponente: LOS zraka i odbijenog zraka, koji je prilikom emitovanja signala odbijen od površinu zemlje. Ovaj model se primenjuje za modelovanje kod ruralnih makro-ćelijskih oblasti gde postoje velike i ravne površine (poput polja i oranica).

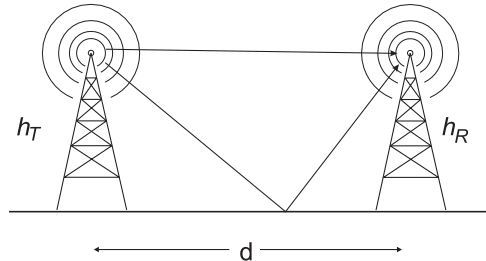
Zavisnost između predajne i prijemne snage kod two ray modela je dat jednačinom:

$$P_R(d) = P_T G \left(\frac{h_R h_T}{d^2} \right)^2 \quad (3.19)$$

ili u dB snaga iznosi:

$$P_R(d) = P_T dB + 10 \cdot \log_{10}(G) + 20 \cdot \log_{10}(h_R h_T) - 40 \cdot \log_{10}(d) \quad (3.20)$$

Karakteristike multipath signala na prijemniku su konstantne ako su predajnik, prijemnik i površi refleksije nepokretne, a u suprotnom menjaju se sa



Slika 3.9: Two ray model

vremenom. Kada je broj lokacija i karakteristika reflektovanih površi poznat tokom vremena, promene su determinističke. Međutim, ako je broj reflektovanih površina veoma veliki ili nisu glatke onda se moraju koristiti empirijske (statističke) metode kako bih se opisao signal na prijemu.

3.2.4 Modelovanje mobilnog kanala Markovljevima lancima

LOS, NLOS, refleksija, rasejanje i difrakcija prouzrokuje degradaciju signala na prijemu (feding). U zavisnosti od pretpostavljene funkcije gustine verovatnoće raspodele prijemnog signala u kanalu sa fedingom MCN se modeluje odgovarajućom raspodelom. Nakagami- m raspodela predstavlja najkorišćeniji i dovoljno opšti model koji je dat formulom [52]:

$$p_X(x) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m x^{2m-1} \cdot \exp\left(-\frac{mx^2}{\Omega}\right), x \geq 0 \quad (3.21)$$

gde je $\Gamma(m)$ standardna Gama funkcija, $\Omega = E[x^2]$ i m parametar fedinga definisan kao $m = \Omega^2 / E[(x^2 - \Omega)^2]$, $m \geq 0,5$. Specijalni slučajevi Nakagami- m fedinga u zavisnosti od parametra m su:

- Gauss-ov feding ($m = 1/2$)
- Rayleigh-jev feding ($m = 2$, upotreba u kanalima sa NLOS modelom prostiranja)
- Rice-ov-feding (aproksimativno $m > 1$, upotreba u kanalima sa LOS modelom prostiranja)

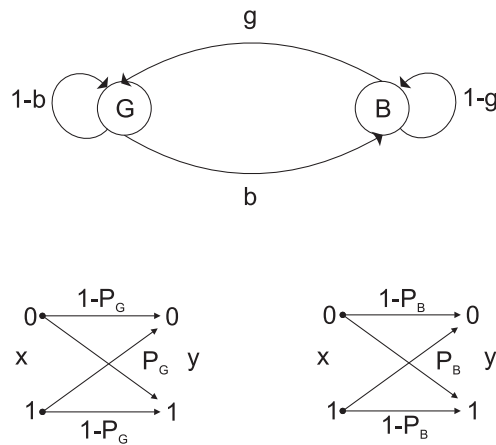
Modelovanjem navedenih efekata opisuje se stanje kanala u jednom trenutku (promenljivost kanala), a ne i ponašanje kanala tokom vremena. Analiza kanala MCN-e tokom nekog vremenskog perioda jeste glavni problem pri modelovanju MCN-e. Samim tim, neophodno je realizovati model kanala koji će uneti vremensku dimenziju. Odnosno, takav model treba da opisuje kanal u nekom vremenskom periodu. Jedan od takvih modela jeste kanal sa konačnim brojem stanja FSC (Finite State Channel). Izvorno, upotrebljava se izraz FSC, gde se stanje kanala pretpostavlja da je Markovljev lanac, tj. Markovljev lanac sa konačnim brojem stanja (Finite State Markov Channel).

Analizu komunikacionih kanala sa memorijom i konačnim brojem stanja, realizovao je Shannon 1957. godine [63]. U [63], Shannon je predstavio teoremu koja karakteriše kapacitet kanala sa konačnim brojem stanja (FSC) sa diskretnim ulaznim i izlaznim simbolima. Razlikuju se situacije kada je stanje kanala poznato na prijemniku, predajniku ili oba. Blackwell i ostali [64] su 1958. godine dokazali Shannon-ovu teoremu za praktičnu klasu FSC sa memorijom.

Gilbert je uveo novi tip FSC modela za određivanje informacionog kapaciteta fiksne telefonske linije sa sporadičnim šumom „burst-noise“ 1960. godine [65]. Jedna od glavnih razlika između Gilbert-ovog modela i Blackwell-ovog modela [64] je u načinu definisanja zavisnosti izlaza kanala od stanja kanala i ulaza. U Blackwell-ovom modelu izlaz kanala je deterministička funkcija tekućeg stanja kanala, tako da je stohastički zavisn samo od trenutnog stanja ulaza i prethodnog stanja u kanalu. Kod Gilbert-ovog modela, izlaz kanala je funkcija trenutnog ulaza i trenutnog stanja u kanalu. Bez obzira na svoju jednostavnost, Gilbert-ov model je bio prvi netrivialni primer modela kanala sa memorijom, gde je stanje kanala statistički nezavisno od ulaznih simbola kanala i nepoznatog predajnika ili prijemnika.

Ubrzo nakon Gilbert-ovog rada [65], Elliott je ovaj model upotrebio kako bi procenio i uporedio performanse za detekciju i korekciju greške koda preko „burst-noise“ kanala [66]. Ovaj model kanala je poznat kao Gilbert-Elliott Channel-GEC i sadrži Markovljev lanac, slika 3.10. Markovljev lanac je definisan sa dva stanja “dobro” (G) i “loše” (B). Verovatnoća prelaza iz stanja G u stanje B je $b = P_r(G \rightarrow B)$ i verovatnoća prelaza iz stanja B u stanje G je $g = P_r(B \rightarrow G)$. Kada je kanal u stanju G , izlaz kanala je u zavisnosti od

ulaza preko diskretnog kanala bez memorije (Discrete Memoryless Channel-DMC), sa verovatnoćom greške $P_G = P_r(0 \rightarrow 1|G)$. U originalnoj verziji GEC, Gilbert je pretpostavio da je stanje G bez šuma tj. da ima verovatnoću greške $P_G = 0$. Pretpostavka dozvoljava Gilbert-u računanje kapaciteta u zatvorenoj formi. Elliott kasnije modifikuje model i prilagođava za nenultu verovatnoću greške u stanju G ili $P_G > 0$. U stanju B , verovatnoća je veća od one u stanju G pa se definiše kao $P_B = P_r(0 \rightarrow 1|B)$.



Slika 3.10: Gilbert-Elliott model kanala.

Istraživači su 1960. godine proširili model koji su predložili Gilbert i Elliott za poboljšanje njihove reprezentacije kanala sa memorijom. McCullough [67] je 1968. godine uveo više stanja kanala u modelu i svaki sa različitom učestalošću greške. Stacionarna stanja u [67] su dozvoljena samo neposredno nakon greške u stanju. Fritchman je u radu iz 1967. godine [68], predložio FSC sa J stanja bez greške i $K - J$ stanja sa greškom. Međutim, model je komplikovan u smislu izvođenja greške kanala, osim ako je greška u jednom bitu stanja ili $K - J = 1$, koji je efikasnost Fritchmanovog modela približio GEC modelu. Gallager, 1968. godine nastavlja dalje razvijati teoriju informacija za FSC kanale [69], koja predstavlja klasičnu temu u naprednoj teoriji informacija. Takođe je naveo i fading kanale u bežičnoj radiotelefoniji kao fizičke kanale sa memorijom koji mogu biti reprezentovani sa FSMC. Gallager-ova definicija FSMC-a je standardna definicija koju koriste istraživači danas. Ovaj model prilagođen je za oba slučaja, prvi gde prelazno stanje kanala upravlja i kontroliše ulazni

kanal (što je slučaj kod ISI kanala), drugi slučaj gde je stanje kanala statistički nezavisno od ulaza u kanal (što je slučaj kod fading kanala).

Podela prijemnog SNR na intervale

Markovljev lanac sa N stanja može se opisati skupom mogućih stanja S :

$$S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_N\} \quad (3.22)$$

U FSMC modelima, stanje najčešće predstavlja interval SNR vrednosti. Prelaz stanja n u stanje $n + 1$ opisano je verovatnoćom prelaza stanja $p_{n,n+1}$ i dato je kao:

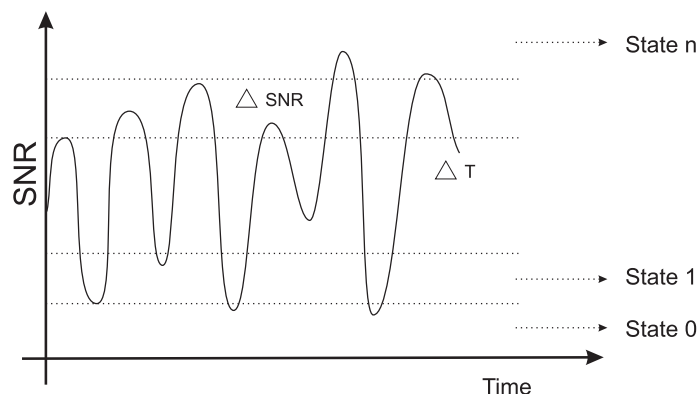
$$p_{n,n+1} = P_r(S_{n+1}|S_n), \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3.23)$$

Verovatnoća prelaza stanja opisuje proces dinamike kanala, tj. promene SNR vrednosti tokom vremena i njenog prelaska iz SNR intervala koje definiše jedno stanje u SNR interval koji predstavlja neko drugo (najčešće susedno) stanje. Stacionarna verovatnoća stanja π_n , koja određuje prosečno trajanje (u odnosu na ukupno vreme posmatranja kanala) koje kanal provede u jednom od stanja Markovljevog lanca i računa se kao:

$$\pi_n = \int_{\gamma_n}^{\gamma_{n+1}} p(\gamma) d\gamma \quad (3.24)$$

gde je γ_n prag SNR intervala n , tj. stanje n definisano je SNR intervalom $S_n = [\gamma_n, \gamma_{n+1}]$, slika 3.11. $p(\gamma_n)$ je statistika trenutnih SNR vrednosti na izlazu kanala (npr. Nakagami-m) [70] (detaljnije u 3.2.5).

Nekoliko ključnih radova bavi se podelom prijemnog SNR na intervale ([71], [72], [73], [74], [75]). Wang i ost. u [72] su upotrebili fiksna SNR stanja modela sa jednakim stacionarnim verovatnoćama $\pi_0 = \pi_1 = \dots = \pi_n = 1/n$, koji je uobičajeni način za SNR podelu u literaturi. Optimizaciona sugestija autora je da se izvrši podešavanje stacionarne verovatnoće najvećeg nivoa na $\pi_n = 2 \cdot \pi_{n-1}$ i $\pi_0 = 1/(2n - 1)$. Na taj način se verovatnoća u stanju višeg nivoa duplira u odnosu na niži nivo, što podrazumeva da SNR ima veću verovatnoću da ostanu u dobrom stanju, međutim ova pretpostavka nije dobro određena [71]. Zhang i ost. u [74] su dali drugačiji pristup podele SNR na intervale i izračunavanje broja stanja. Dodeljuje se jednako prosečno trajanje

Slika 3.11: Primer podele SNR na n intervala

svakom stanju, gde je SNR interval dovoljno veliki kako bi se primljeni paket kompletno obuhvatio u odgovarajuće stanje. Sa druge strane širina intervala nije prevelika kako bi paket u istom stanju zadržao istu bitsku grešku BER (Bit Error Rate). Drugi modeli podele poput Zorzi-a i ost. u [73], koji su koristili model sa 2 stanja, dok su Tan i ost. [75] koristili 50 do 100 stanja modela. U tabeli 3.2 dat je skraćeni pregled osnovnih načina modelovanja kanala sa FSMC modelom. Treba napomenuti da ne postoji jednostavno i jasno rešenje o tome kako da se podeli SNR na prijemu u FSMC modelu. To može da zavisi od mnogih faktora: složenosti modela, zahtevane tačnosti, primene, vrste modulacije/demodulacije, šeme kodiranja, koji uvek predstavlja kompromis između tačnosti modela i njegove složenosti [76].

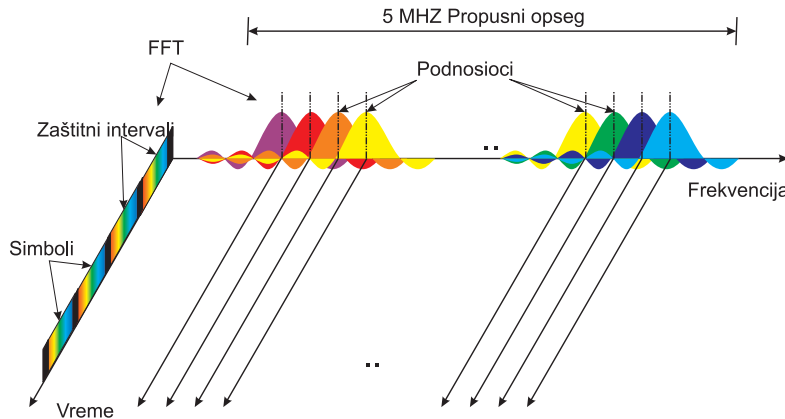
3.2.5 Modelovanje FSMC modela za OFDM sisteme

Ortogonalno frekvencijsko multipleksiranje (OFDM) jeste modulaciona tehnika kojom se ostvaruju velike brzine prenosa podataka u uslovima frekvencijski selektivnih kanala. Kod OFDM sistema spektar je podeljen na višestruke nosioce koji se nazivaju podnosioci, pri čemu se veoma efikasno koristi raspoloživi opseg frekvencija na osnovu međusobne ortogonalnosti podnosioca, slika 3.12. Svaki podnosioc je nezavisno modulisan. Osim toga, OFDM je otporan na štetne efekte multipath propagacije, jer se zahvaljujući pravilnim izborom veličine cikličnog prefiksa (detalji u 4.1.1) onemogućuje pojava ISI. Na osnovu

autori	vrsta istraživanja	rezultati i komentari	stanja i podela
Wang i Moayeri (1995)	FSMC matematičke karakteristike i simulacije	potvrđena je tačnost matematičkih izraza za matricu P sa simulacionim rezultatima	8 stanja modela jednake verovatnoće, $\pi_0 = \pi_1 = \dots$ $\pi_n = 1/n$
Wang i Moayeri (1993)	mogućnost modelovanja FSMC sa različitim brojem stanja i intervala	pokazan je uticaj broja stanja i različitih šema podele na kapacitet	2 do 16 stanja, jednake verovatnoće, $\pi_n = 2 \cdot \pi_{n-1}$ i $\pi_0 = \frac{1}{(2n-1)}$
Zhang i Kassam (1999)	metodologija podele na SNR	ne objašnjava činjenicu da SNR i e (crossover probability vector) imaju nelinearan odnos	2 do 16 stanja, jednake verovatnoće, metod kvantizacije
Zorzi i Rao (1998)	proces blok greške: praćenje simbol po simbol model praga (threshold model)	model praga aproksimiran simbol po simbol modelu u širokom opsegu parametara	2 stanja
Tan i Beaulieu (2000)	potvrđena je ispravnost upotrebom teorije informacija i stohastičke analize	određeni su opsezi i primene prvog reda FSMC	od 50 do 100 stanja modela jednake verovatnoće

Tabela 3.2: Pregled FSMC modela (preuzeto iz [11]).

svojih dobrih osobina OFDM je našao primenu u više standardizovanih žičnih i bežičnih sistema za prenos podataka pri velikim brzinama. Takođe izvesna je njegova upotreba u narednim generacijama širokopojasnih MCN-a [77].



Slika 3.12: Vremensko-frekvencijsko predstavljanje jednog OFDM signala (preuzeto iz [2]).

U ovoj disertaciji za modelovanje bežičnih kanala u kojima deluje fading koristi se FSMC model iz [74]. Podela SNR na intervale u FSMC modelu urađena je prema ekvidistantnoj metodi podele na jednake intervale [78]:

$$\pi_k = \int_{\Gamma_k}^{\Gamma_{k+1}} p_{\Gamma}(\gamma) d\gamma = F_{\Gamma}(\Gamma_{k+1}) - F_{\Gamma}(\Gamma_k) = 1/K \quad (3.25)$$

gde π_k predstavlja verovatnoću stacionarnog stanja, $p_{\Gamma}(\gamma)$ funkciju gustine raspodele trenutnih SNR vrednosti, Γ_k nivo praga intervala, F_{Γ} združenu kumulativnu funkciju gustine raspodele trenutnih SNR vrednosti, a K ukupan broj stanja u FSMC modelu. U slučaju prenosa paketa prelaz u sledeće stanje modela je posle isteka intervala emitovanja jednog paketa. Primitveni paket je u stanju kanala K , ako se vrednost SNR tog paketa nalazi u intervalu $[\Gamma_k, \Gamma_{k+1})$. Interval SNR koji predstavlja jedno stanje, potrebno je da bude dovoljno veliki, kako bi obuhvatio period trajanja jednog paketa. Takođe, interval trajanja jednog stanja ne može biti ni suviše veliki, jer bi onemogućili pretpostavku da se kanal veoma malo menja tokom prenosa jednog paketa. Na taj način, paketi koji pripadaju istom stanju imali bi različitu verovatnoću greške po bitu.

Promena iz jednog u drugo stanje u FSMC modelu definisano je verovatnoćama prelaska stanja $t_{k,k}$ (jednačina (3.27)). Promene stanja su moguće samo u dva susedna stanja (tj. iz trenutnog stanja u prvo susedno stanje sa boljim ili lošijim uslovima kanala). Verovatnoće prelaza stanja računaju se na osnovu formule učestanosti kojom signal prelazi zadate SNR nivoe $N(\Gamma_k)$ - (Level Crossing Rates-LCR):

$$N(\Gamma_k) = 2\sqrt{\pi} \frac{\tau_{rms} C_f}{\Gamma_m} \left(\frac{m}{\gamma} \Gamma_k\right)^{m-\frac{1}{2}} e^{-\frac{m}{\gamma} \Gamma_k} \quad (3.26)$$

Tako da se prelazne verovatnoće aproksimiraju kao:

$$\begin{aligned} t_{k,k-1} &\approx \frac{N(\Gamma_k)}{L\pi_k}, \quad k = 1, 2, \dots, K-1, \\ t_{k,k+1} &\approx \frac{N(\Gamma_{k+1})}{L\pi_k}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, K-2 \end{aligned} \quad (3.27)$$

gde L predstavlja ukupan broj podnosioca u propusnom opsegu C_f , a $L\pi_k$ prosečan broj podnosioca sa SNR u stanju s_k , $t_{k,k-1}$ i $t_{k,k+1}$ prelaze u jedno stanje niže i jedno više u odnosu na trenutno stanje. Jednačinom (3.28) računa se ostatak verovatnoća prelaza:

$$\begin{aligned} t_{0,0} &= 1 - t_{0,1}, \\ t_{K-1,K-1} &= 1 - t_{K-1,K-2}, \\ t_{k,k} &= 1 - t_{k,k-1} - t_{k,k+2}, \quad k = 1, 2, \dots, K-2 \end{aligned} \quad (3.28)$$

Izborom SNR intervala stanja i upotrebom jednačina (3.25), (3.27) i (3.28) mogu se dobiti stacionarne verovatnoće stanja i verovatnoće prelaska stanja i time kompletirati FSMC model. Ovaj model, sa specifičnim izborom SNR intervala koja je definisana LTE podelom na tzv. CQI intervale (Channel Quality Indicator) biće osnova za modelovanje eNB-UE kanala koje ćemo koristiti u poglavlju 5.

3.3 Modelovanje mobilne bežične mreže primenom stohastičke geometrije

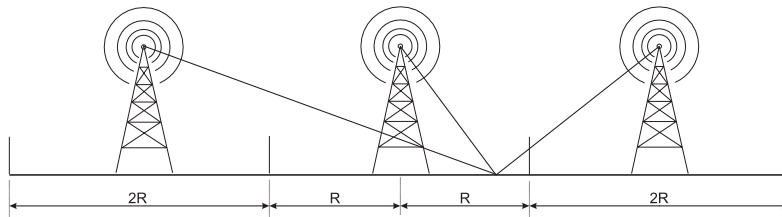
3.3.1 Modelovanje stohastičkom geometrijom

Usled velikog interesovanja korisnika za uređajima koji imaju mogućnosti slične računarima (poput smart telefona, tableta i senzora), dolazi do povećanja njihovog broja iz dana u dan. Očekuje se da će do 2020. godine biti više od 50 milijardi povezanih uređaja u MCN-i [38].

Prvi korak u realizaciji mrežne infrastrukture predstavlja raspodelu samo makro eNB-a (1-klasna mreža). Ova struktura zahteva ogromne investicione troškove (Capital Expenditure-CAPEX) koja bi se veoma teško mogla nadoknaditi sa smanjenjem troškova usluga. Sledeći korak jeste popularna HetNet mreža koja čini tzv. višeklasnu (multi-tier) MCN-u. Višeklasna MCN je širok pojam koji podrazumeva koegzistenciju različitih mreža (npr. tradicionalna makro ćelija sa malim ćelijama u MCN-i). Svaka od njih čini posebnu mrežnu klasu (tj. 1-klasnu mrežu) MCN-e. Male ćelije će rasteretiti procenat UE-a koji su povezani u “zagušenom” sloju makro MCN-e. Samim tim, smanjuje se broj UE-a koje opslužuje svaka makro eNB pojedinačno, što dovodi do većeg kvaliteta servisa (Quality of Service-QoS) po UE-u. Neke od malih ćelija (npr. femto ćelije) raspoređuje i upravlja korisnik komunikacionih servisa. Iz tog proizilazi da su pojedini delovi mreže izuzeti od CAPEX i OPEX troškova. Višeklasne MCN-e su predviđene da obezbede brz, fleksibilan i ekonomičan dizajn nadogradnje MCN-e za postojeće ćelijske arhitekture [79], [80]. Smanjenje ICI između ćelija predstavlja ključni faktor u MCN-a. Od velikog je interesa za istraživače i standardizaciona tela, na koji način se uz pomoć modela za analizu i projektovanje tehnika upravljanja može uticati na smanjenje ICI [81]. Međutim, analitičkih tehnika za takve modele upravljanja nema dovoljno. Tradicionalni (višeklasni-grid) modeli MCN-a su suviše kompleksni, da bi ih istraživači analitički opisali. Iz tog razloga često se primenjuju jednostavni modeli a jedan od njih je realizovao Wyner [82]. U poređenju sa realnim MCN-a, najpopularnija je linearna verzija Wyner modela, slika 3.13. Ova model prema [81] ima tri glavna pojednostavljenja:

- smatra se da je ICI samo od dve susedne ćelije

- promene path loss-a se zanemaruju zbog slučajnih lokacija UE-a
- intenzitet ICI od svake susedne eNB-e opisan je parametrom α , gde je ($0 \leq \alpha \leq 1$)



Slika 3.13: Wyner model-linearna verzija.

Izračunavanje ICI u ovakvom modelu MCN-e, dovodi do rezultata koji zahtevaju dugu Monte Karlo simulaciju [83]. Takođe, dobijaju se netačni rezultati zbog nerealnih pretpostavki [81]. Usled razlika u gustini eNB-a, kada su u pitanju gradska jezgra, parkovi, prigradska i vangradska naselja, raspodela eNB-a neće pratiti heksagonalni model. Do ovog zapažanja došlo se snimanjem MCN-a na različitim lokacijama, tako da se raspodela eNB-a dovodi u vezu sa slučajnom raspodelom. Na taj način, heksagonalni model gubi smisao i smatra se previše idealizovanim. Jedan od primera nedostataka Wyner-ovog modela je rad [81]. Autori su u delu rada posvećenom downlink kanalu pokazali da Wyner-ov model postaje netačan u slučaju velikog broja istovremenih UE-a. Uzrok netačnosti leži u ICI, koja po Wyner-u dolazi samo od susednih eNB-a i njen uticaj kao da ne postoji. Širenje mrežne infrastrukture tradicionalnim tehnikama (razdvajanjem ćelija) ne može da se nosi sa izazovom rasta broja UE-a i njihovim servisnim zahtevima. Samim tim, neophodno je povećati kapacitet i protok takve MCN-e. U odgovoru na taj izazov, industrija i standardizaciona tela trebaju razvijati nova rešenja. Složene geometrijske strukture javljaju se u mnogim oblastima nauke i često zahtevaju statističku analizu. Analiza skupova podataka tih struktura zahteva odgovarajuće matematičke modele i statističke metode. Matematička oblast koja nastoji da obezbedi takve modele i metode naziva se stohastička geometrija (Stochastic Geometry) [40]. Takođe, pojavom velikih bežičnih sistema (kao što su MCN-e i senzorske mreže), njihove oblasti pokrivenosti postaju predmet intenzivnog

istraživanja tokom poslednje decenije. Klasične metode teorije komunikacija generalno su nedovoljne za analiziranje novih vrsta MCN-a iz sledećih razloga [35]:

1. veće ograničenje za Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio (SINR) nego SNR
2. interferencija je funkcija geometrije mreže gde su karakteristike path loss-a i fadinga zavisne
3. neodređenost koja postoji u MCN-i, daleko prevazilazi neodređenost koja postoji u point-to-point sistemima (nije moguće za svaki čvor poznavati ili predvideti lokaciju i vrstu kanala, osim za možda nekoliko susednih čvorova)

Rešenje se pronalazi u primeni stohastičke geometrije kao i slučajnih geometrijskih grafova (random geometric graphs) [84]. Stohastička geometrija realizuje novi način modelovanja MCN-e, gde se fenomen raspodele eNB-a u heterogenoj MCN-i bolje modeluje statističkim nego determinističkim modelima. Ona je izričito vezana za teoriju procesa generisanja tačaka. Stohastička geometrija obezbeđuje prirodan način definisanja i izračunavanja makroskopskih osobina kao i prosečnih vrednosti (uprosečavanje) geometrijskih struktura. Lokacije eNB-a modelovane su slučajnim procesom generisanja tačaka. Sa druge strane, stohastičku geometriju dopunjava teorija slučajnih geometrijskih grafova, koji predstavljaju na slučajan način zavisnost rastojanja i međusobnu povezanost čvorova u MCN-a [85], [86]. Autori u radu [35] dali su kratak pregled razvoja stohastičke geometrije i slučajnih geometrijskih grafova. Na osnovu njihove analize stohastička geometrija se koristila kao sredstvo za opis ISI u bežičnim mrežama još 1978. godine [87], a unapređena je od strane Sousa i Silvestera u ranim 90-im [88], [89]. Ilov i Hatzinakos u [90] opisuju uticaj slučajnih pojava u kanalu (fading, shadowing, path loss i njihovih kombinacija). Baccelli i grupa autora počeli su razvijati alate za optimizaciju strukture bežične mreže na osnovu Poisson-Voronoi dijagrama i Delaunay trougaonih površi (Delaunay triangulations) [91]. Zatim prvi rad iz oblasti slučajnih geometrijskih grafova može se pripisati Gilbert-u. On je u [84] analizirao formiranje mreže kao povezivanje tačaka koje su dovoljno blizu jedna drugoj. Svoje istraživanje Gilbert

je zasnovao na modelu Broadbent-a i Hammersley-a radu [92]. Konačno model verovatnoće pokrivenosti, po uzoru na predhodne modele dat je u [93].

3.3.2 Osnovni parametri stohastičke geometrije

U slučaju analize LTE-A HetNet mreže kao K-tier (K-klasne) MCN-e svaku od K-klasa čini različit skup eNB-a. eNB-e, koje pripadaju klasama, razlikuju se u jačini predajne snage P i gustini raspodele λ . Pretpostavlja se da će UE biti u oblasti pokrivenosti signalom, ako je u mogućnosti da se poveže sa najmanje jednom eNB-m u bilo kojoj klasi sa SINR vrednošću iznad određenog praga (threshold) β . Vrednost SINR praga ne mora biti ista za sve klase, već svaka klasa može imati i sopstvenu vrednost SINR praga. Pretpostavlja se Rayleigh-jev fading između eNB-a (koja se nalazi u tački x) i UE (koji je u koordinatnom početku - tačka $(0,0)$) a označava se kao h_x . Path loss funkcija dobija se iz jednačine $l(x) = \|x\|^{-\alpha}$, gde je $\alpha > 2$ path loss eksponent. Tako da je $P_i h_{x_i} \|x_i\|^{-\alpha}$ prijemna snaga UE-a (sa lokacijom na mestu x_i -gde i predstavlja pripadnost i -toj klasi) koju emituje eNB-a. Prosečna vrednost SINR na mestu prijema (tj. UE-a) predstavlja odnos eNB-e na koju je UE konektovan i svih ostalih eNB-a (kojima se još pridodaje šum) a prema [50] data je kao:

$$SINR(x_i) = \frac{P_i h_{x_i} \|x_i\|^{-\alpha}}{\sum_{j=1}^K \sum_{x \in \Phi_j/x_i} P_j h_x \|x\|^{-\alpha} + \sigma^2}, \quad (3.29)$$

gde je σ^2 konstantna vrednost snage šuma (additive noise), Φ_i je skup raspodeljenih eNB-a i -te klase prema PPP. Posmatra se open access model u MCN-i dobijen iz Teo.1 i Corollary 1, Sek. III.A, [50]. Ovakav model dozvoljava UE-a da se konektuje na eNB-e bilo koje klase i bez ikakvog ograničenja. Verovatnoća da je dati UE pokriven signalom sa najbliže eNB-e tako da je ukupan SINR na mestu UE-a veći od threshold-a β za klasu kojoj pripada najbliža eNB-a naziva se verovatnoća pokrivenosti. Verovatnoća pokrivenosti P_c open access modela izračunava se prema [50], na osnovu jednačine koja sledi:

$$P_c(\{\lambda_i\}, \{\beta_i\}, \{P_i\}) = \frac{\pi}{C(\alpha)} \frac{\sum_{i=1}^K \lambda_i P_i^{2/\alpha} \beta_i^{-2/\alpha}}{\sum_{i=1}^K \lambda_i P_i^{2/\alpha}}, \quad (3.30)$$

gde je $\beta_i > 1$. $C(\alpha) = 2\pi^2 \cdot \csc(\frac{2\pi}{\alpha})\alpha^{-1}$ a $\csc(\theta) = 1/\sin(\theta)$, β_i prag SINR i -te klase. Za $K = 1$ (1-klasnu mrežu) verovatnoća pokrivenosti dobija se kao:

$$P_c(\lambda, \beta, P) = \frac{\pi}{C(\alpha)\beta^{2/\alpha}} \quad (3.31)$$

U jednačini (3.31), P_c je ograničena po pitanju ICI i nezavisna od λ . P_c isključivo zavisi od parametara pathloss-a α i SINR praga β , koji je potrebno unapred definisati. Svi UE-i čije su vrednosti SINR veće od β smatraju se pokrivenim. To je u skladu sa [49], gde je napravljena slična analiza 1-klasne mreže upotrebom modela [50] za povezivanja na najbližeg suseda. U skorijem radu [94] autori su predstavili još jedan model (PPP-model), koji pokazuje da raspodela eNB-a stohastičkom geometrijom preuzima dominantnost u odnosu na heksagonalni model raspodele. Oni su istraživali tačnost PPP modela MCN-e u odnosu na eksperimentalne podatke. Koristili su isključivo realne lokacije eNB-a (na osnovu originalnih fotografija područja), LOS/NLOS uslove kanala i zračenja antena. Lokacije eNB-a su preuzete iz velike baze podataka koju je ustupio OFCOM [95], a fotografije zgrada preuzete su od Ordnance Survey (Britanska agencija koja često obnavlja mapu terenskog područja kompletnog UK) [96]. Autori ukazuju da se na osnovu njihovih prethodnih istraživanja PPP modela mogu tačno predvideti performanse MCN-a-e u gustim urbanim sredinama. Oni napominju zavisnost performansi PPP modela od modela kanala i zračenja antena koje se koriste. U radu je predstavljen jedan važan doprinos tj. uvedena je aproksimacija za modelovanje empirijskih LOS/NLOS uslova prostiranja i zračenja antena (npr. ako je UE u objektu, tada se smatra da UE ima LOS samo prema eNB-i koja je u objektu a prema svim ostalim eNB-a je NLOS). Ova aproksimacija olakšava simulaciju na nivou sistema (zahvaljujući upotrebi realnih lokacija eNB-a) i matematičko modelovanje MCN-e. Takođe, ona povezuje telekomunikacione operatere (na dalje samo operater) i vladine agencije sa jedne strane kao i akademske i istraživačke organizacije na drugoj strani, zbog preciznih podataka o lokacijama eNB-a. Detaljna matematička analiza može se naći u [97]. Posmatrane su eNB-e od strane O_2 i Vodafone operatera i analizirane su dve kategorije eNB-a:

1. rooftop eNB-e-odnosi se na eNB-e koje se nalaze u geografskim regionima (poligonima) objekata

2. outdoor eNB-e-odnosi se na eNB-e koje se nalaze izvan geografskih regiona (poligona) objekata.

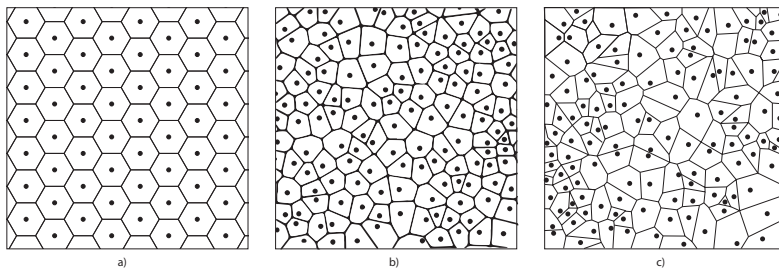
U regionima grada Manchester-a operateri su pružali svoje usluge preko iste eNB-e. Kako bi autori ispitali uticaj deljenja eNB-e u MCN-i realizovana su dva scenarija. Prvi, eNB-a-e O_2 i Vodafona rade na različitim frekvencijama, tako da nema ICI (međusobnog ometanja). Ovo je ekvivalentno postojanju samo jednog operatera u regionu od interesa. Dakle, samo eNB-e jednog operatera su dostupne za tipičnog UE-a. U drugom scenariju, eNB-e O_2 i Vodafona koriste iste eNB-e i rade na istoj frekvenciji. Dakle, gušća raspodela eNB-a je dostupna u regionu od interesa i eNB-e oba operatera su dostupne za tipičnog UE-a. Pretpostavlja se full frequency reuse za eNB-e istog operatera i protok podataka koji obezbeđuje pouzdan prenos. Takođe sve eNB-e koje su na raspolaganju, osim onih koje su isključene, pružaju servisnu uslugu UE-a. Autori koriste eksperimentalne podatke, koji odgovaraju stvarnom raspoređivanju objekata u Londonu i Manchester-u za LOS/NLOS uslove prostiranja. Ovim se bliže određuju realna blokiranja, koja potiču od strane lokacija objekata i njihovih oblika. Kako bi se potvrdila tačnost podataka iz preuzetih baza vršeno je poređenje sa Google maps. Podaci o visinama objekata u gradovima nisu bili dostupni i autori nisu uvrstili njihov uticaj. Upotrebljena su tri modela blokiranja LOS/NLOS uslova prostiranja koja su međusobno upoređena:

1. empirijski (ako niti jedan objekat ne preseca optičku vidljivost na liniji eNB - UE veza je LOS, inače je NLOS)
2. 3GPP (daje statistički model za identifikaciju LOS i NLOS veze tj. ne trebaju nikakve empirijski informacije o lokacijama eNB-a i zgrada. Pretpostavka je da prostiranje LOS/NLOS zavisi sa nekom verovatnoćom od rastojanja između eNB-e i UE-a. Korišćen je LOS/NLOS urban mikro outdoor UE model iz [60] koji dobro predstavlja posmatrane geografske regione London-a i Manchester-a)
3. 1-state (LOS/NLOS uslovi prostiranja su često zanemareni i pretpostavlja se da su svi linkovi ili LOS ili NLOS. Npr. ako je link NLOS onda je $p^{NLOS}(r) = 1$ i $p^{LOS}(r) = 0$)

Osim modela blokiranja posmatrani su: path loss, shadowing i fast-fading. U slučaju path loss-a posmatran je fizički ograničen model:

$$l^{(S)}(r_{i,k}) = k^{(S)}(\max(r_0, r_{i,k}))^{\alpha^{(S)}} \quad (3.32)$$

gde je $r_{i,k}$ rastojanje između eNB-e i UE-a, $S=LOS$ ili $S=NLOS$ u zavisnosti da li je veza eNB - UE LOS ili NLOS. $k^{(S)}$ je path loss u slobodnom prostoru, a $\alpha^{(S)}$ je path loss eksponent, dok je za shadowing i fast-fading pretpostavljena nezavisna raspodela. Zračenje antena predstavljeno je sa dva modela: omni-direkcionalnim i 3GPP modelom. Autori u PPP model uvode aproksimacije realnih modela blokiranja i zračenje antena. Glavni cilj jeste modelovanje LOS/NLOS veze (koje potiču od realnog stanja rasporeda objekata) i praktičnih modela zračenja antena uz pretpostavku da su eNB-e u PP modelu raspodeljene prema PPP. Model blokiranja u PPP modelu uveden je kao aproksimacija za LOS/NLOS veze i optimizovan je sa tačke gledišta UE-a. Poznat je pod nazivom multi-ball model blokiranja. Multi-ball model zasniva se na zameni aktuelnih LOS/NLOS verovatnoća UE-a. Rastojanja r između eNB-e i UE-a se dele na $N + 1$ region koji odgovara broju od N lopti sa centrom u poziciji UE-a. Povećavanjem broja N multi-ball aproksimacioni model postaje tačniji, ali raste njegova analitička i simulaciona složenost [94]. Neophodno je kompromisno izračunavanje parametara modela koje se zasniva na teoremama iz [98]. Na kraju autori dolaze do zaključka, da stvarna raspodela eNB-a u London-u i Manchester-u više teži njihovom PPP-modelu (tj. PPP raspodeli) nego heksagonalnom, slika 3.14.



Slika 3.14: a)Heksagonalni model b)Aktuelni 4G model c)PPP model

Glava 4

LTE/LTE-A tehnologija i MBMS servis

Sve veći zahtevi korisnika za pouzdanom i brzom isporukom sadržaja (npr. multimedijalnih), uslovljavaju unapređenje komunikacionih usluga od strane operatera. Kao odgovor na ovakav izazov operateri su u obavezi da stalno vrše inovacije komunikacionih sistema. Cilj inoviranog sistema je ispunjenje zahteva korisnika, smanjenja troškova održavanja i instalacije operatera, kao i međusobnu kompatibilnost sistema različitih proizvođača i operatera. Ispunjenje napomenutih zahteva leži u LTE/LTE-A sistemima četvrte generacije MCN-a, koji u sebi imaju integrisan MBMS servis. Ovaj servis omogućava istovremenu isporuku multimedijalnog sadržaja velikom broju UE-a kroz multicast ili broadcast metod prenosa.

4.1 LTE/LTE-A

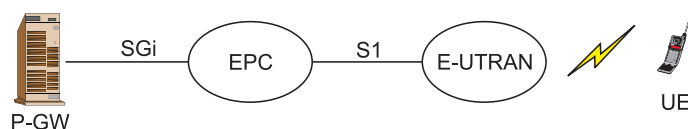
4.1.1 Arhitektura LTE/LTE-A mreže

Osnovni cilj nove LTE mreže jeste povećanje spektralne efikasnosti mobilnih ćelijskih sistema i smanjenje kašnjenja tokom prenosa. Ona omogućava poboljšanje postojećih aplikacija ali će predstaviti i nove, zahtevnije aplikacije:

- HDTV (High Definition Television) distribucija - tehnologija koja ima kvalitet slike i zvuka značajno veći od kvaliteta tradicionalne tehnologije
- VoIP-a (Voice over Internet Protocol) - predstavlja Internet telefoniju ili prenos glasa internetom
- video blogovi - vrsta sajta gde UE-i aplikacija na korisničkim uređajima mogu da ostavljaju i razmenjuju poruke
- interaktivna televizija - pruža veću programsku ponudu, učestvovanje gledaoca u izboru programskog sadržaja

- interaktivna igra - komunikacija više igrača u igri putem interneta u realnom vremenu u cilju dobre zabave

Ukupna sistemska arhitektura 3GPP sadrži dva bloka: osnovnu mrežu CN (Core Network) i radio pristupnu mrežu (RAN). U daljem radu 3GPP odvajaju funkcionisanje između ova dva bloka mreže. Ovakva podjela funkcionalnosti definisala je novu SAE (System Architecture Evolution) arhitekturu sistema. Na taj način SAE definiše ravnu RAN arhitekturu poznatiju kao paketska prenosna mreža EPC (Evolved Packet Core). E-UTRAN i EPC su objedinjeni u evoluirani paketski EPS sistem (Evolved Packet System) [99]. Rezultat je pojednostavljena LTE mrežna arhitektura, a broj mrežnih čvorova i nivoa hijerarhije između UE i njihovih pristupnih tačaka je smanjen. Mrežnim operaterima ravna arhitektura donosi jednostavnost i skalabilnost, iz čega proizilaze manja ulaganja i OPEX. Sa tačke gledišta krajnjeg UE-a ovo donosi bolje performanse, a pre svega brži odziv na zahtev servisa. Protoci se kreću maksimalno 50 Mbit/s u uplink-u (smer prenosa informacije je od UE-a prema eNB-i) i 100 Mbit/s u downlink-u (smer prenosa informacije je od eNB-e prema UE-u), a širina kanala je fleksibilna u intervalu od 1.4 – 20 MHz [100]. Korisnički terminal, E-UTRAN i EPC čine osnovne blokove u arhitekturi LTE mreže, slika 4.1.



Slika 4.1: LTE arhitektura mreže

Korisnički uređaj-UE

Arhitektura UE-a za LTE je identična uređaju koji koriste UMTS i GSM tj. ME (Mobile Equipment). ME se sastoji iz tri modula, slika 4.2:

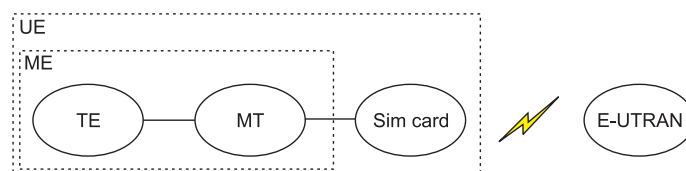
- mobilnog uređaja MT (Mobile termination) - upravlja svim komunikacionim funkcijama
- uređaja krajnjeg korisnika TE (Terminal equipment) - uspostavlja i prekida prenos podataka

UE kategorija	Release	max broj bita po ms (downlink)	max broj bita po ms (uplink)
1	R8	10296	5160
2	R8	51024	25456
3	R8	102048	51024
4	R8	150752	51024
5	R8	299552	75376
6	R10	301504	51024
7	R10	301504	102048
8	R10	2998560	1497760

Tabela 4.1: Kategorije UE-a (preuzeto iz [12]).

- UICC (Universal integrated circuit card) predstavlja SIM karticu (SIM card) u UE-u za LTE. SIM kartica obavlja funkciju čuvanja specifičnih podataka (broj telefona, identitet mreže) i podataka korisnika [101].

UE-i podržavaju različite radio tehnologije, protoke podataka i nosioce frekvencija. Najvažnije mogućnosti grupisane su zajedno u tzv. UE-u kategoriju, tabela 4.1. Glavni sadržaj UE-e kategorije je maksimalan protok podataka na mestu predaje i prijema.



Slika 4.2: Korisnički terminal

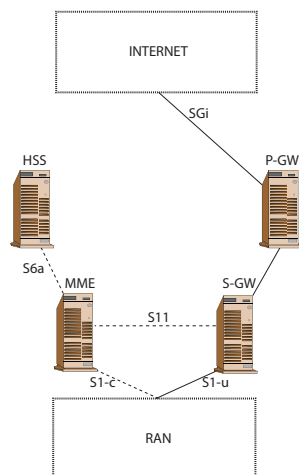
Paketska prenosna mreža-EPC

EPC predstavlja značajno unapređenje CN (definiše ravnu RAN arhitekturu) u odnosu na CN koja se koristila u GSM/GPRS i WCDMA/HSPA. Ona podržava samo pristup komutacijom paketa (packet-switched domain). Osnovni elementi bloka EPC su:

- P-GW ili PDN (Packet Data Network Gateway) - pripada korisničkoj ravni, predstavlja IP ruter koji rutira saobraćaj sa E-UTRAN u EPC. UE se preko dodeljenog P-GW povezuje sa EPC. Često se na nivou cele mobilne mreže nalazi samo jedan P-GW.
- S-GW (Serving Gateway) - pripada korisničkoj ravni, ostvaruje komunikaciju između eNB-e i EPC. Nekoliko S-GW mogu činiti mrežu, gde svaki S-GW ima svoje UE-e koji se trenutno nalaze u njegovoj oblasti rada. UE-u se dodeljuje jedan S-GW. eNB-a menja svoj S-GW kada prelazi u oblast rada drugog S-GW.
- MME (Mobility Management Entity) - pripada kontrolnoj ravni, sadrži kontrolne funkcije: uspostavljanja i raskidanja veze UE-a sa mrežom, proveru identiteta UE-a, nadzor neaktivnih UE-a, pozivanje UE-a, upravljanje prilikom prelaska na druge mreže (GSM, WCDMA). UE je povezan na isti MME dok se nalazi u njegovoj oblasti rada.
- HSS (Home Subscriber Server) - je centralna baza podataka koja sadrži informacije o svim pretplatnicima operatera, slika 4.3.

Pored ovih, EPC sadrži i druge vrste čvorova, kao što je PCRF (Policy and Charging Rules Function) koji realizuje odluke održavanja usluga uz saglasnost QoS-a i informiše P-GW o tome. Postoje i čvorovi koji pružaju podršku MBMS servisu (o kojima ce detaljno biti reči u sekciji 4.2.1) [102], [103].

Poređenjem P-GW bloka iz 4G sa GGSN (Gateway GPRS Support Node) iz UMTS i GSM arhitekture, pokazuje se da imaju istu ulogu. Međutim, SGSN (Serving GPRS Support Node) iz UMTS i GSM arhitekture sada u 4G ima dva bloka S-GW i MME. Podela SGSN na S-GW i MME omogućava operateru da skalira mrežu u odnosu na njeno opterećenje. Odnosno, porastom saobraćaja operater povećava broj S-GW, dok porastom broja UE-a operater povećava broj MME. S1 interfejs (standardizovana veza između dva uređaja) ima dve komponente $S1-u$ i $S1-c$. $S1-u$ interfejs prenosi korisničku poruku od eNB-e do S-GW, dok $S1-c$ interfejs prenosi kontrolnu poruku od eNB-e do MME. Obično se umesto interfejsa S1 komunikacija ostvaruje putem IP prenosne mreže.

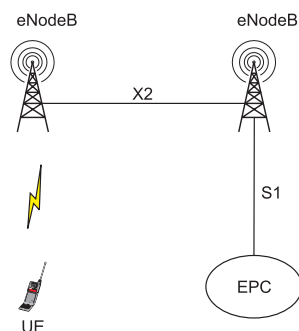


Slika 4.3: Paketska prenosna mreža-EPC

Radio pristupna mreža E-UTRAN

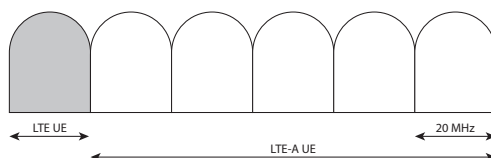
Uspostavljanje veze između UE-a i EPC vrši se uz pomoć E-UTRAN mreže slika 4.4, čija struktura sadrži samo eNB-e kao elemente. eNB kontroliše UE-e u jednoj ili više ćelija. UE može ostvariti komunikaciju samo sa jednom eNB-m i jednom ćelijom u isto vreme (od Release 12 dozvoljen Dual Connectivity (DC) u LTE mrežama, tj. povezivanje UE-a sa dve eNB-e). eNB ima dve osnovne funkcije: šalje signale za sve UE-e (u njenom domenu) putem downlink-a i prima signale od njih putem uplink-a, koristeći E-UTRAN interfejs i kontroliše sve UE-e slanjem signalnih poruka. Veza između EPC i svake eNB-e ostvarena je sa interfejsom *S1*, dok je međusobna povezanost eNB-a ostvarena sa interfejsom *X2*. Na taj način je izostavljen upravljački čvor RNC (Radio Network Controller) iz UMTS (3G) arhitekture, a deo njegovih funkcija prenet je na EPC odnosno na eNB-e. U slučaju da *X2* ne postoji njegovu funkciju preuzima interfejs *S1*. Slično kao kod EPC, umesto interfejsa *S1* i *X2* komunikacija se obično ostvaruje putem IP prenosne mreže.

LTE-A je dizajnirana da bude kompatibilna sa LTE u smislu da LTE mreže razmenjuju podatke sa istim eNB-a koje rade po LTE-A standardu i suprotno. LTE-A stoga nije nova tehnologija već samo jedan korak unapređenja u daljem razvoju LTE. Karakteristike LTE-A date su u Release 10 3GPP

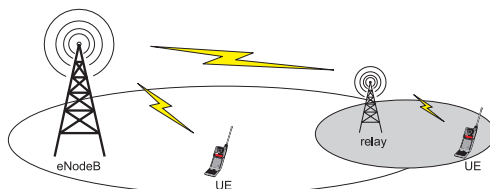


Slika 4.4: Radio pristupna mreža E-UTRAN

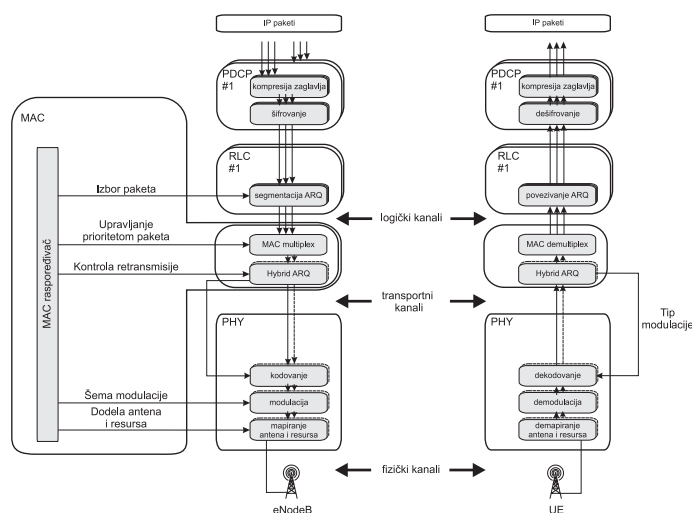
specifikaciji (mart 2011). Osnovno unapređenje u odnosu na LTE podrazumeva širi propusni opseg na osnovu agregacije više nosilaca (Carrier Aggregation), naprednije MIMO tehnike u oba pravca (downlink i uplink), podršku relejnih čvorova (Relay Node) i podršku za heterogene mreže (Heterogeneous Networks-HetNets). Agregacija nosilaca predstavlja slaganje SCC (Secondary Component Carriers) LTE nosilaca (od 20 MHz), gde se na taj način LTE-A mreži povećava širina propusnog opsega (npr. 100 MHz), slika 4.5. Napredne MIMO tehnike podrazumevaju verzije 8x8 MIMO za downlink i 4x4 MIMO za uplink kod LTE-A, umesto dotadašnjih 2x2 MIMO (za downlink i uplink) kod LTE. Podrška relejnih čvorova podrazumeva komunikaciju UE sa mrežom preko relej čvora. Suštinski, relej je nisko-naponska eNB-a bežično povezana sa preostalim delom mreže. Glavna osobina releja je bežični backhaul, jer se obezbeđuje jednostavan način poboljšanja pokrivenosti i povećava se kapacitet mreže, slika 4.6, postavljanjem releja na kritičnim mestima. Postavljanjem manjih ćelija unutar oblasti velikih makro ćelija pruža se podrška za HetNets koja poboljšava karakteristike RAN u pogledu pouzdanosti linka i povećanja protoka [99].



Slika 4.5: Agregacija nosilaca



Slika 4.6: Relej čvor



Slika 4.7: Struktura korisničke ravni LTE protokola

eNB-UE interfejs

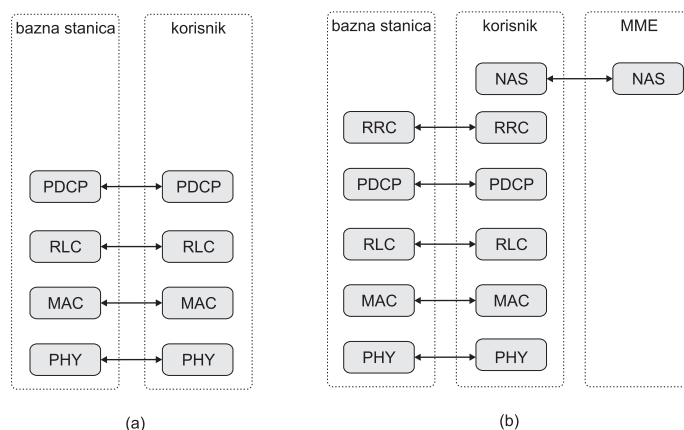
Svi interfejsi povezani su protokol stekom koji mrežni elementi koriste za razmenu podataka i signalnih poruka. Protokol stek ima dve ravni korisničku i kontrolnu, slika 4.7, slika 4.8. Protokoli korisničke ravni upravljaju podacima koji su od interesa za UE-e, a protokoli kontrolne ravni upravljaju podacima koji su od interesa za same elemente mreže. Korisnička ravan sadrži: PDCP (Package Data Convergence Protocol), RLC (Radio Link Control), MAC (Medium Access Control) i PHY (Physical) protokole, tabela 4.2, dok kontrolnu ravan čine: NAS (NonAccess Stratum) i RRC (Radio Resource Control) protokoli, tabela 4.3 [12], [99].

PDCP protokol	vrši kompresiju zaglavlja i šalje zahtev za ponovno slanje pogrešno primljenih paketa
RLC protokol	vrši segmentaciju PDCP paketa u zavisnosti od veličine transportnog bloka i korekciju greške uz pomoć metode ARQ (Automatic Repeat Request-automatski zahtev za ponovno slanje poruke)
MAC protokol	vrši multipleksiranje i demultipleksiranje logičkih kanala, korekciju greške uz pomoć HARQ (hybrid ARQ), uplink i downlink raspodelu paketa (scheduling)
PHY protokol	vrši kodovanje/dekodovanje, modulaciju/demodulaciju

Tabela 4.2: Protokoli u korisničkoj ravni.

NAS protokol	vrši kontrolu veze između UE-a i EPC, upravlja sesijama za uspostavljanje i održavanje IP konekcije između UE i P-GW
RRC protokol	vrši kontrolu komunikacije između UE-a i eNB-e, prenosi poruke NAS sloju

Tabela 4.3: Protokoli u kontrolnoj ravni.



Slika 4.8: Protokol stek na eNB-UE interfejsu: a) korisnička i b) kontrolna ravan

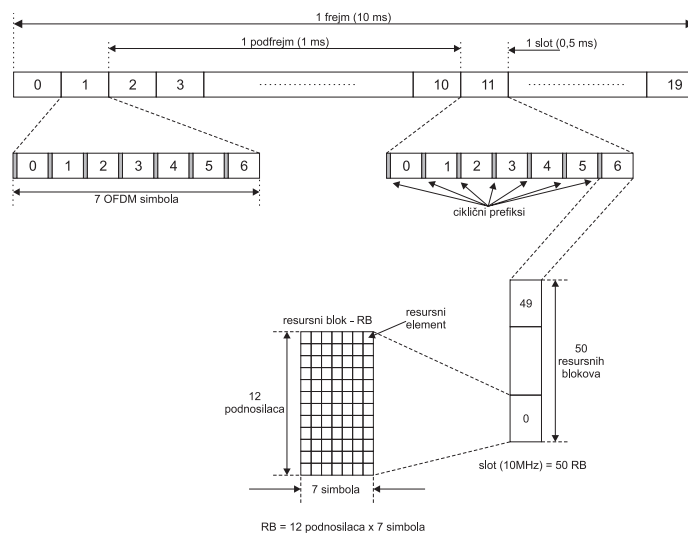
Širina propusnog opsega	1.4	3	5	10	15	20
broj RB	6	15	25	50	75	100
broj zauzetih podnosioca	72	180	300	600	900	1200

Tabela 4.4: Frekvencijski spektar i specifikacija resursa (preuzeto iz [13]).

Struktura okvira (frame) fizičkog sloja LTE/LTE-A downlink-a

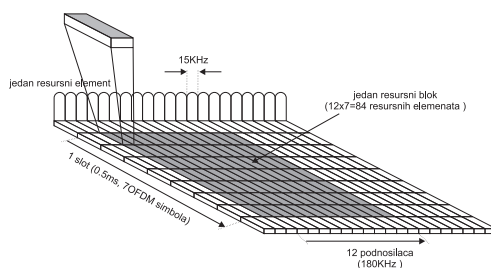
OFDM predstavlja osnovu za LTE downlink prenos. LTE prenos u downlink-u čine frejmovi širine (trajanja) 10 ms. Oni su raspodeljeni na 10 podfrejmova širine 1 ms. Podfrejmovi se dele na dva slota širine 0.5 ms a svaki slot sadrži 6 ili 7 OFDM simbola u zavisnosti da li je ciklični prefiks (Cyclic Prefix) produženi (trajanje $16.7\mu s$), odnosno normalan (trajanje $4.7\mu s$), slika 4.9.

Fizički resursi LTE downlink-a u vremensko-frekvencijskoj dimenziji predstavljeni su na slici 4.10. Ovi resursi se sastoje od niza resurs blokova (Resource Block-RB) fizičkog sloja koji definišu podelu resursa u frekvencijskom domenu i vremenskoj sekvenci TTI slotova koji definišu podelu resursa u vremenskom domenu. RB je trajanja 0.5 ms i širine opsega 180 kHz (12 OFDM podnosilaca, koji su širine 15 kHz). Svaki RB ima $12 \cdot 7 = 84$ resursna elementa (u slučaju normalnog cikličnog prefiksa), a $12 \cdot 6 = 72$ resursna elementa (u slučaju produženog cikličnog prefiksa). Normalan ciklični prefiks koristi se



Slika 4.9: Frejm struktura LTE (preuzeti iz [3])

kada je rastojanje između predajnika i prijemnika manje od 1.4 km, dok se produžni ciklični prefiks koristi za rastojanja do 10 km. Resursni element predstavlja jedan OFDM podnosilac tokom trajanja intervala jednog OFDM simbola [104]. LTE-A mreža ima istu strukturu frejma kao i LTE. Frekvencijski spektar i odgovarajuća specifikacija resursa dati su u tabeli 4.4, a uporedne karakteristike LTE i LTE-A u tabeli 4.5.



Slika 4.10: Fizički resursi u vremensko-frekvenciskoj dimenziji (preuzeto iz [4])

parametar	LTE	LTE-A
brzina prenosa	100 Mbit/s na DL 50 Mbit/s na UL	1 Gbit/s na DL 500 Mbit/s na UL
propusni opseg DL	20 MHz	100 MHz
propusni opseg UL	1.25 – 20 MHz	20 – 100 MHz
pokrivenost	poluprečnik ćelije do 5 km	isto kao kod LTE može se optimizovati za lokalne mikro ćelijske oblasti
broj aktivnih korisnika po ćeliji	minimalno 200 u opsegu 5 MHz minimalno 400 u opsegu većem od 5 MHz	tri puta veći nego kod LTE
mobilnost	0 – 15 km/h (optimizovano za ovaj opseg) 15 – 120 km/h (visoke performanse zagarantovane) 120 – 135 km/h (bez prekidanja veze)	ista kao kod LTE
kašnjenje	5ms za korisničku ravan na IP sloju jednosmerno, kašnjenje od 100 ms u kontrolnoj ravni iz početnog u aktivno stanje	5 ms za korisničku ravan na IP sloju jednosmerno, kašnjenje od 50 ms u kontrolnoj ravni iz početnog u aktivno stanje

Tabela 4.5: Uporedne karakteristike LTE i LTE-A [14] [15].

DTCH kanal Dedicated Traffic Channel	unicast prenos korisničkih podataka u downlink-u
MTCH kanal Multicast Traffic Channel	prenos MBMS servisa u downlink-u
PCCH kanal Paging Control Channel	prenosi poruku UE-u o dolaznom pozivu eNB-e (eNB-a ne zna tačnu poziciju UE-a)
MCCH kanal Multicast Control Channel	prenosi informacije potrebne za prijem MTCH
BCCH kanal Broadcast Control Channel	prenosi poruku o slanju sistemskih kontrolnih signala (UE-u od strane eNB-e)

Tabela 4.6: Logički kanali.

Logički, transportni i fizički kanali LTE mreže

3GPP LTE standard imao je za cilj stvaranje efikasnijeg i jednostavnijeg protokol steka i arhitekture. Većina kanala koja je navedena u prethodnim 3GPP standardima zamenjeni su zajedničkim kanalima i smanjen je ukupan broj fizičkih kanala. S obzirom da je fokus ove disertacije MBMS servis, akcentat će biti na kanalima LTE mreže od interesa za MBMS. Logičkim kanalima MAC sloj ostvaruje vezu i razmenjuje podatke sa RLC slojem. Logički kanali definisani su u zavisnosti od tipa informacije koju nose na kanale za prenos saobraćaja (Traffic Channel), koji se koriste za prenos korisničkih podataka i kontrolne kanale (Control Channel), koji se koriste za prenos informacija koje kontrolišu i konfiguriraju LTE mrežu. Vrste logičkih kanala date su u tabeli 4.6, shema mapiranja na slici 4.11, a protokol stek na slici 4.8.

MAC protokol je transportnim kanalima povezan sa fizičkim slojem. Transportni kanali definisani su u zavisnosti koje i kakve karakteristike se prenose radio interfejsom. Podaci transportnog kanala su organizovani u obliku transportnih blokova (TB). Radio interfejsom do jednog UE-a (i suprotno) može se preneti najviše jedan TB dinamičke veličine u svakom vremenskom intervalu prenosa (TTI) ako ne postoji vremensko multipleksiranje. Vrste transportnih kanala dati su u tabeli 4.7, shema mapiranja na slici 4.11, a protokol stek na slici 4.8. Multipleksiranje logičkih kanala i njihovo mapiranje na odgovarajuće transportne kanale je jedna od funkcija MAC sloja. Na shemi mapiranja jasno

PCH kanal Paging Channel	vrši poziv UE-a od strane eNB-e tj. prenosi pozivnu informaciju od PCCH
BCH kanal Broadcast Channel	prenosi korisnički sadržaj u jednom smeru od eNB-e prema UE-u
MCH kanal Multicast Channel	podrška za MBMS tj. grupno slanje podataka u jednom smeru od eNB-e prema UE-u
DL-SCH kanal Downlink Shared Channel	dodeljuje raspoložive resurse UE-u, prilagođava izmene modulacije, kodovanja i mogućnost upravljanja dijagramom zračenja tj. glavni transportni kanal za downlink LTE

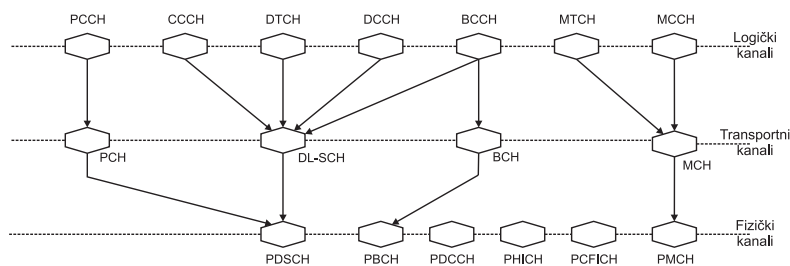
Tabela 4.7: Transportni kanali.

se vidi da je DL-SCH kanal glavni za usmeravanje transportnih kanala.

Fizički kanali obezbeđuju primopredaju na PHY sloju. Svaki fizički kanal je određen skupom resursnih elemenata koji nose informaciju iz viših slojeva protokol steka za prenos bežičnim interfejsom (Air Interface). Od svih fizičkih kanala jedino je PMCH (Physical Multicast Channel) namenjen MBMS servisu (formira fizički kanal za MBMS prenos). Ostali fizički kanali upotrebljavaju se za unicast prenos. Shema mapiranja data je na slici 4.11, a protokol stek na slici 4.8.

Fizičkim kanalom takođe se prenose referentni i sinhronizacioni signali koji se jednim imenom zovu fizički signali. Oni mapiraju određeni resursni element koji koristi PHY sloj, ali ne nose informaciju koja potiče od viših slojeva. Jedna od osnovnih karakteristika LTE standarda je raspodela kanala u frekvencijskom domenu. Na primer, UE mora eNB-i obezbediti informaciju o kvalitetu kanala CSI (Channel State Information) zbog realizacije downlink raspodele. CSI se može dobiti merenjem referentnog signala koji se prenosi u downlink-u. Referentni signali prenose signale koji se generišu iz generatora sinhronizovane sekvence u predajniku ili prijemniku. Ovi signali se postavljaju u određene resursne elemente u vremensko-frekvencijskoj dimenziji. Downlink referentni signali obezbeđuju procenu (Estimate) kvaliteta kanala potrebnih za ekvalizaciju (Channel Equalisation) i demodulaciju kontrolnih i korisničkih informacija. Takođe imaju ključnu ulogu u merenju CSI koja je neophodna za povratnu informaciju o kvalitetu kanala. LTE ima pet vrsta referentnih

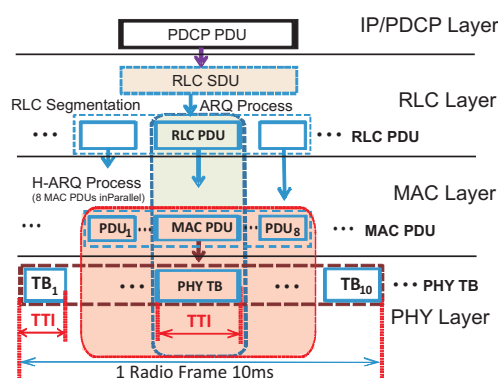
signala u downlink prenosu: CSR (Cell-Specific Reference Signals), DM-RS (Demodulation Reference Signal) ili korisnički (UE-specific reference signal), CSI-RS (Channel-State Information Reference Signal), SFN-MBMS (Single-Frequency Network MBMS Signal) i pilot referentne signale (Pilot Reference Signals). CSR se prenosi u svakom downlink podfrejmu i resurs bloku u frekvencijskom domenu, čime pokriva celokupan ćelijski propusni opseg. CRS se koristi da odredi CSI korisnika. Na osnovu CSI, CRS se upotrebljava za izbor ćelije i handover (prelazak UE-a iz jedne u drugu ćelijsku oblast) odluku. DM-RS ili UE-i referentni signali koriste se u downlink prenosu, gde se ne koristi CRS za procenu kanala. DM-RS je prvo uključen u Release 8 kao podrška jednom sloju (single-layer), zatim u Release 9 podržava dva (two-layer), dok u Release 10 ide do osam (eight-layer) istovremenih referentnih signala koji se koriste za višeslojni MIMO prostorni multipleks (MIMO Spatial Multiplexing). Kada se koristi samo jedan DM-RS, postoji 12 referentnih simbola unutar para RB-a. Osnovna razlika između CRS i DM-RS je u antenskim portovima. CRS zahteva slobodne resursne elemente (Spectral Null) antenskih portova, dok dva DM-RS koriste dve antene i svih 12 referentnih signala se prenose putem oba porta. CSI-RS (Channel State Information Reference Signal) je uveden u Release 10 (LTE-A) za slučaju od 4 do 8 antena. Njegova glavna funkcija je da ublaži problem merenja CSI kada je više od osam antena u upotrebi. Na taj način, LTE-A može da podrži 4×2 , 4×4 i 8×8 MIMO konfiguracije. CSI-RS zahteva CSI, dok DM-RS podržava funkcionalnost estimacije kanala [18], [99].



Slika 4.11: Mapiranje downlink kanala.

Slika 4.12 predstavlja detaljan prikaz komunikacije (tok downlink paketa) između eNB-e i UE-a. Paketi dolaze do eNB-e kroz PDCP protokol koji vrši

kompresiju i šifrovanje zaglavlja. Nakon toga, paketi se dostavljaju RLC sloju. RLC sloj obavlja segmentaciju ili kaskadno povezivanje paketa u RLC pakete kako bi stali u zahtevanu veličinu MAC frejma. MAC sloj stoga podešava RLC pakete na veličinu TB-a koji je definisan parametrima (kodovanje, modulacija i broj alociranih fizičkih RB-a (PHY RB)) na fizičkom sloju. Svaki MAC frejm alocira jedan TB za prenos od eNB-e prema UE-u (interfejsa eNB/UE). Treba napomenuti da su navedene samo neke od funkcija koje pomenuti protokoli obavljaju.



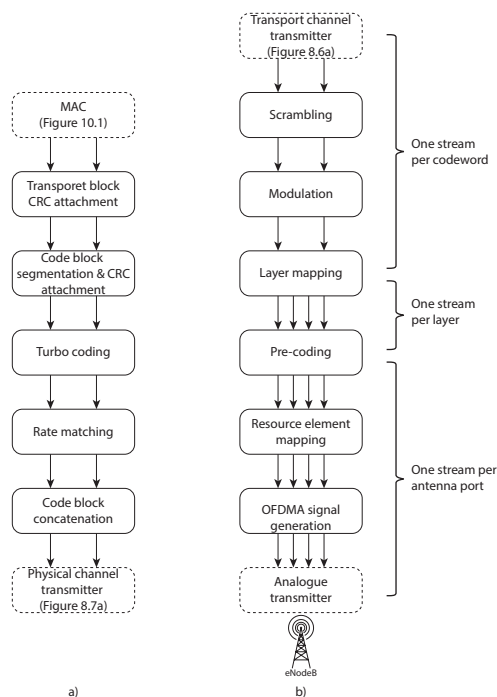
Slika 4.12: Tok downlink paketa

Prenos podataka kroz MAC i PHY sloj

U downlink prenosu eNB dodaje niz CRC (Cyclic Redundancy Check) za proveru redundanse, koji proverava da li je došlo do greške pri prenosu frejma, svakom DL-SCH transportnom bloku, slika 4.13a. Zatim se vrši segmentacija unutar kodnih blokova (maksimalne veličine 6144 bita-u Release 9) i dodaje još jedan CRC svakom bloku. Nakon toga podaci prolaze kroz turbo koder (1/3 rate-kodna brzina). U fazi usklađivanja kodne brzine (Rate Matching) rezultujući biti se skladište u kružnom baferu iz koga se biraju biti za prenos. Broj prenesenih bita je određen veličinom alociranih resursa. Konačno eNB ponovo sastavlja kodovane TB i šalje ih fizičkom kanalu u obliku kodnih reči (Code-words). Algoritam turbo dekodovanja se ponavlja sve dok CRC kodni blok ne bude prihvaćen. Prijemnik zatim ponovo sastavlja svaki TB i koristi CRC za detekciju greške. Kodne reči iz transportnog kanala prosleđuju se na dalju

obradu fizičkom kanalu, čiji je prenos prikazan na slici 4.13b. Skremblovanjem se svakoj kodnoj reči dodaje pseudoslučajna sekvenca tako da se uspostavi zavisnost od ćelije u čijoj oblasti se vrši prenos. Na taj način se smanjuje ICI od susednih ćelija. Modulator (tj. Modulation Mapper) uzima rezultujuće bite u grupe od dva, četiri i šest i vrši njihovo mapiranje putem fazne i kvadrature komponente upotrebom QPSK modulacije (16-QAM ili 64-QAM). Sloj mapiranja (Layer Mapping) uzima kodne reči i mapira na jedan do četiri nezavisna sloja. Pre-coding faza primenjuje izabranu pre-coding matricu i mapira slojeve na različitim antenskim portovima. Resursni mapirani element (Resource Element Mapper) sprovodi konverziju (serijska u paralelnu) i mapira rezultujuće podstrimove na odabranim podnosiocima, kontrolne kanale i fizičke signale. PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) obuhvata sve resursne elemente i regione podataka svih podfrejmova koji nisu dodeljeni drugim kanalima ili signalima. Na kraju OFDMA signalni generator (OFDMA Signal Generator) primenjuje inverznu brzu Fourier-ovu transformaciju IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) i konverziju (paralelna u serijsku) ubacujući ciklični prefiks. Rezultat je digitalni prikaz podataka u vremenskom domenu koji će biti prosleđen sa svakog antenskog porta [12].

MAC sloj osim multipleksiranja različitih logičkih kanala i njihovog mapiranja na odgovarajuće transportne kanale vrši korekciju greške HARQ shemom. Ova shema na MAC podsloju vrši ponovno slanje pogrešno primljenih TB-a i na taj način ispravlja greške tokom prenosa. HARQ protokol koristi višestruke stop-and-wait HARQ procese. Umesto statusne poruke koja sadrži redni broj sekvence, jedan bit HARQ povratne informacije ACK/NACK (Acknowledgment/Negative Acknowledgment) pruža informacije o uspešnom prijemu HARQ procesa. Ovim postupkom smanjuje se vreme kašnjenja. Kada je CRC provera uspešna, MAC HARQ prijemnik isporučuje RLC PDU (RLC Protocol Data Units) do odgovarajućeg RLC entiteta (multipleksirajući u okviru jednog transportnog kanala). RLC paketi treba da budu isporučeni u nizu u kojem su poslani, a prijemnik zna kako da ih složi jedan za drugim jer su numerisani RLC sequence number-om. Međutim, zbog HARQ procesa na MAC sloju, može se desiti da neki RLC paketi budu retransmitovani više puta i RLC PDU paket koji je kasnije emitovan stigne pre RLC PDU paketa koji je ranije emitovan. Čim prijemnik dobije RLC PDU paket koji nije u redosledu



Slika 4.13: Faze transportnog a) i fizičkog b) kanala (Release 8 i 9)

(neki kasniji je stigao pre), on startuje re-sekvencioni tajmer (Reordering Timer), čekajući fiksno vreme da se RLC PDU paket isporuči HARQ procesom. Ovo se dešava kada RLC prijemnik detektuje neodgovarajući RLC PDU paket u sekvenci primljenih RLC PDU paketa na osnovu RLC sequence number-a. Tada počinje ponovno slanje RLC PDU paketa koji nedostaje, putem HARQ protokola (protokol koji koristi stop-and-wait HARQ procese). Upotrebom HARQ procesa i re-sekvencionog tajmera koristi se manje overhead-a. U slučaju kada istekne vreme re-sekvencionog tajmera, jedan RLC prijemni mod šalje statusnu poruku koja sadrži sequence number RLC PDU paketa koji nedostaje svom predajniku. MAC sloj tretira statusnu poruku RLC-a kao bilo koji drugi podatak, tako da se primenjuje ista HARQ operacija i CRC nad njom. Shodno tome, greška ili gubitak ARQ povratne informacije može se otkriti ili obnoviti slanjem drugog RLC statusa. Prijemom statusne poruke RLC-a, ARQ predajnik ponovo emituje odgovarajući RLC PDU paket.

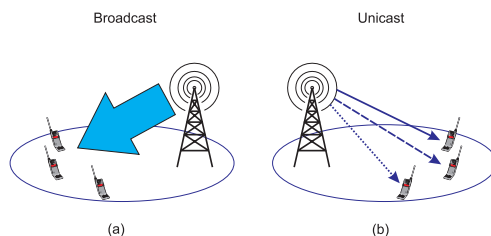
HARQ sloj ne pokušava da poveže ponovno slanje RLC-a sa prethodnim slanjem, već ponovno slanje RLC-a tretira kao novi podatak. Činjenica da RLC i MAC završavaju u istim čvorovima omogućena je bolja povezanost podslojeva ova dva protokola. U LTE mreži HARQ predajnik može ukazivati na tzv. lokalni NACK na ARQ predajniku, ako se zna ili pretpostavlja da HARQ prenos nije uspeo. Ovakav slučaj se javlja prilikom maksimalnog broja pokušaja HARQ prenosa (kada je izabrana modulacija i shema kodovanja preslaba za dati kvalitet kanala). Osnovna prednost lokalnog NACK-a je smanjenje vremena detekcije kašnjenja [105].

4.2 MBMS servis

4.2.1 Arhitektura MBMS servisa

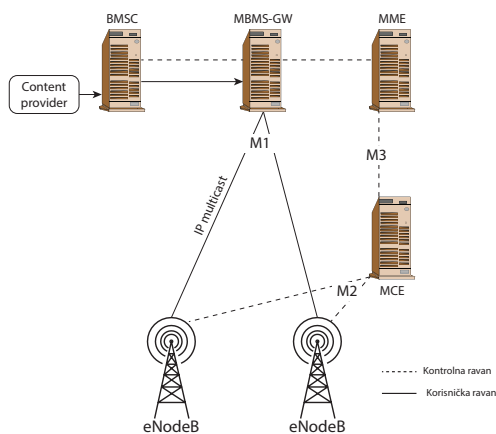
MCN-e su koristile unicast prenos za usluge poput uspostavljanja telefonske veze i web pretraživanja. Unicast prenos prenosi sadržaj putem pojedinačnih veza ili tokova paketa prema svakom UE-u, slika 4.14b. Međutim, usluge kao što su mobilne televizije prirodno nameću upotrebu za multicast/broadcast prenosom. Broadcast prenos emituje isti sadržaj prema većem broju UE-a u ćeliji (slika 4.14a), dok je multicast prenos omogućen ka UE-a koji su se prijavili na multicast grupu. Raspodelu podataka putem multicast/broadcast prenosa mreža vrši putem IP multicast. UMTS je u Release 6 implementirao multicast/broadcast prenos u okviru MBMS servisa [106]. MBMS je pogodan jer emituje video sadržaj velikom broju UE-a preko zajedničkog radio kanala, a podržava i različite tipove sadržaja kao što su: tekst, slika, video, govor. 3GPP je u okviru Release 8 počeo sa radom na MBMS preko LTE E-UTRAN mreže, ali je konačna specifikacija objavljena u Release 9. Odnosno, u Release 9 date su samo osnovne operacije MBMS servisa a ostala poboljšanja predstavljena su u Release 10 i Release 11. MBMS i E-UTRAN su poznati kao eMBMS (enhanced MBMS). Podršku MBMS servisu u okviru EPC i E-UTRAN mreže čine sledeći blokovi:

- MCE (Multi-cell multicast Coordination Entity) - je logički čvor u E-UTRAN koji vrši kontrolu pristupa, upravlja alokacijom radio resursa svih eNB-a u SFN-MBMS oblasti.



Slika 4.14: Broadcast (a) i Unicast (b) prenos

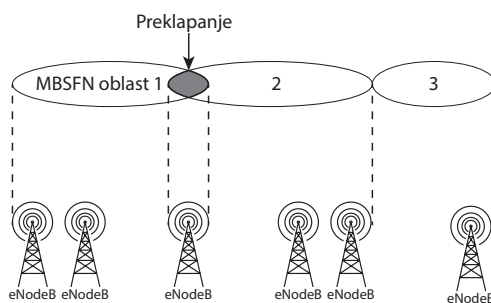
- BMSC (Broadcast/Multicast Service Center) - predstavlja izvor MBMS prenosa. Započinje servisne radnje i njima informiše UE-e o sledećem MBMS servisu.
- MBMS GW (MBMS Gateway) - prosleđuje MBMS korisničke podatke između BMSC i eNB-a, vrši kontrolu MBMS sesije. MBMS gateway koristi IP multicast protokol za prenos između MBMS i eNB-e i tako ostvaruju vezu sa MBMS servisom. MBMS gateway alokira IP multicast adresu eNB-a i povezuje sa MBMS servisom, slika 4.15.



Slika 4.15: MBMS arhitektura

MBMS servis sadrži dve sheme prenosa SC-MBMS (Single-Cell MBMS) i SFN-MBMS (Single Frequency Network MBMS). SC-MBMS servisnom shemom sve eNB-e nezavisno emituju isti sadržaj u isto vreme, ali je kontrola kvaliteta

prepuštena svakoj eNB-i i sadržaj se ne emituje ako u ćeliji nema UE-a. Takođe, eNB-e podešavaju adaptivne parametre prenosa (PHY FEC kodovanje i modulaciju) prema broju i blizini UE-a u ćeliji. U SC-MBMS eNB-e prenose različite signale u različitim ćelijama i ukoliko rade u istom frekvencijskom kanalu, uzrokuju ICI jedna drugoj (dok kod SFN to nije slučaj). LTE koristi tehniku SFN-MBMS kako bi unapredio multicast/broadcast prenos. SFN-MBMS servisnom shemom sve eNB-e sinhrono emituju potpuno isti sadržaj u isto vreme i na istim podnosiocima, odnosno sadržaj se emituje i ako u ćeliji nema UE-a. Sinhronizovana eNB nalazi se u geografskom regionu koji predstavlja SFN-MBMS oblast, slika 4.16. Ove oblasti mogu se preklapati, tako da jedna eNB može prenositi više skupova sadržaja od strane različitih SFN-MBMS oblasti. Emitovanjem istog signala od strane susednih eNB-a nema međusobnih smetnji, već se doprinosi povećanju snage signala na mestu prijema. Na ovaj način povećava se SNR i protok podataka na ivicama ćelija, gde je inače ICI najveća [12], [6]. SC-MBMS shema ima arhitekturu sličnu standardnom LTE unicast prenosu, a od Release 10 može da se prenosi i putem SFN-MBMS podfrejma (jer SFN-MBMS od Release 10 prerasta u SFN-eMBMS, Evolved MBMS). Stoga u ovoj disertaciji sva dalja objašnjenja MBMS servisa svodiće se na SFN-MBMS servisnu shemu.

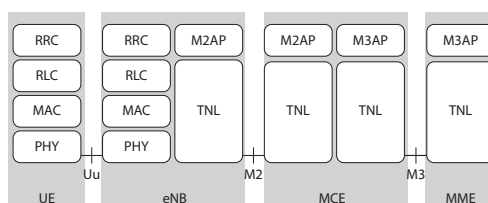


Slika 4.16: SFN-MBMS oblasti

Kontrolna i korisnička ravan MBMS servisa

Osim elemenata koji se nalaze u arhitekturi sistema LTE kontrolne ravni, MBMS kontrolna ravan sadrži M2 (M2AP) i M3 (M3AP) aplikacioni protokol. M2 aplikacioni protokol se koristi za kontrolu MBMS signala između eNB-e i

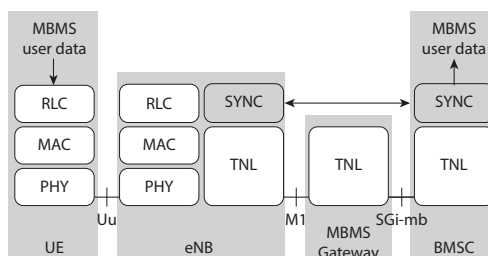
MCE bloka, a M3 aplikacioni protokol se koristi za kontrolu MBMS signala između MCE i MME blokova. M2AP i M3AP se koriste za kontrolnu signalizaciju MBMS sesije (početak i kraj sesije), slika 4.17. Takođe, MBMS korisnička ravan ima IP multicast protokol koji preko M1 interfejsa prosleđuje MBMS korisničke podatke od MBMS GW prema eNB-i. SYNC protokol se definiše na sloju transportne mreže TNL (Transport Network Layer) da podrži sinhronizaciju sadržaja. On se koristi za prenos MBMS korisničkih podataka od BMSC do eNB-e i koordinirani prenos istih MBMS korisničkih podataka iz različitih eNB-a. SYNC protokol nosi dodatnu informaciju koja omogućava eNB-a identifikaciju vremena za prenos frejma kao i detekciju gubitka paketa. eNB-e koje učestvuju u SFN-MBMS prenosu dužne su pridržavati se sinhronizacije sadržaja. eNB-e koje prenose sadržaj samo u oblast jedne ćelije ne moraju biti u skladu sa vremenski navedenim zahtevima SYNC protokola. eNB upravlja sa UE-m, ako se on nalazi u aktivnom RRC stanju (RRC-CONNECTED), na osnovu informacija koje dobija od UE-a, slika 4.18. Međutim, kada je UE u RRC stanju mirovanja (RRC-IDLE), eNB nije povezana sa njim. UE u tom stanju nadgleda kanale za detekciju dolaznih poziva i dobija informacije o sistemu [6], [99].



Slika 4.17: Kontrolna ravan MBMS servisa

Protokoli MBMS servisa

MBMS u okviru LTE zahteva nove logičke, transportne i fizičke kanale. E-UTRAN ima MCCH (Multicast Control Channel) i MTCH (Multicast Traffic Channel) point to multipoint logičke kanale za MBMS interfejs. Mapiranje downlink LTE-MBMS kanala predstavljeno je na slici 4.19 i naznačeni su kanali za podršku LTE koji realizuju MBMS prenos. MCCH se nalazi u kontrolnoj ravni između UE-a i eNB-e. Ovaj logički kanal koristi se za emitovanje RRC



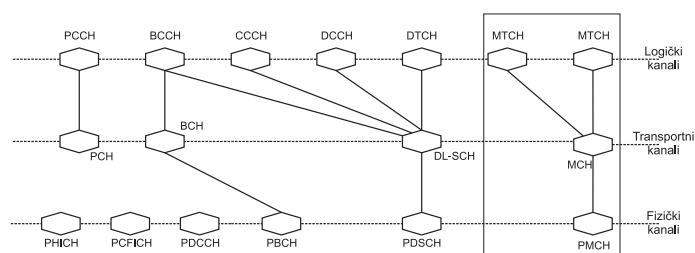
Slika 4.18: Korisnička ravan MBMS servisa

poruka koje su u vezi sa MBMS, odgovarajućoj SFN-MBMS oblasti. RRC sloj eNB-e kreira RRC poruke zasnovane na MBMS kontrolnoj informaciji dobijenoj od MCE bloka E-UTRAN-a. MCCH kanal je mapiran na transportni kanal MCH, a MCH je mapiran na fizički kanal PMCH. Kada je MCCH mapiran na MCH, postoji samo jedan MCCH kanal za jedan MCH kanal. MTCH kanal se nalazi u korisničkoj ravni radio interfejsa između UE-a i eNB-e. Ovaj logički kanal koristi se za emitovanje MBMS korisničkih podataka od strane MBMS servisa. eNB-a prima korisničke podatke od BMSC preko MBMS-GW upotrebom SYNC protokola. MTCH kanal je mapiran na MCH kanal a MCH je mapiran na PMCH kanal. Više od jednog MTCH kanala može biti mapirano na jedan MCH kanal kako bi se postiglo kvalitetnije multipleksiranje MBMS podataka za prenos. E-UTRAN obezbeđuje različite MCCH kanale za različite SFN-MBMS oblasti. Mapiranje MBMS kanala za više SFN-MBMS oblasti prikazano je na slici 4.20. Na slici se vidi da jedna ćelija treba da obezbedi više MCCH kanala, ako se SFN-MBMS oblasti preklapaju. MCCH kanali se emituju u različitim MBMS frejmovima.

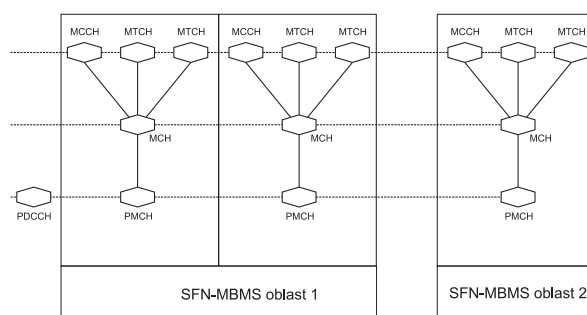
Ažuriranje MCCH informacije

Ćelija koja podržava MBMS koristi PDCCH (Physical Downlink Control Channel) kako bi obavestila UE-e o ažuriranju MCCH informacije, tj. MBMS kontrolna informacija dostavljena je putem jednog ili više MCCH kanala. Obaveštenje o ažuriranju MCCH informacije, PDCCH kanalu se prosleđuje putem MBMS MRNTI (Radio Network Temporary Identifier). Iako se više SFN-MBMS oblasti mogu preklapati u ćeliji, samo jedan MRNTI se koristi za prosleđivanje ažurirane MCCH informacije do PDCCH kanala. MRNTI takođe

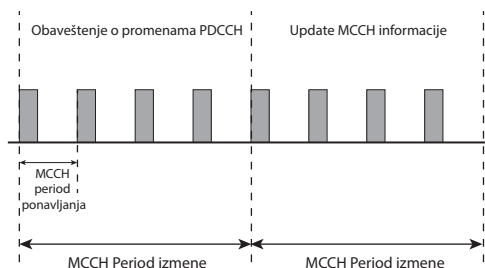
poseduje informaciju o označenim SFN-MBMS oblastima na koje se odnosi ažurirana MCCH informacija. Prenos MCCH informacije se vrši u intervalima sa fiksnim periodom ponavljanja i MCCH informacija se menja samo u određenim vremenskim trenucima. Ažuriranje MCCH informacije (ili njenog dela), vrši se samo na početku novog perioda izmene, slika 4.21. Svrha MRNTI indikatora u okviru PDCCH kanala je da obezbedi UE-u štednju potrošnje baterije, prateći samo PDCCH pre prijema korisničkih podataka od sesije MBMS servisa. Kada UE počinje dobijati podatke za sesiju, on dobija i MCCH informacije koje su vezane za sesiju. Na taj način eNB-a MRNTI indikatorom nagoveštava PDCCH kanalu samo kada se MCCH informacija menja, zbog MBMS procedura session start ili counting request (detaljnije u 4.2.1) [6], [99].



Slika 4.19: Mapiranje downlink LTE-MBMS kanala.



Slika 4.20: Mapiranje MBMS kanala za više SFN-MBMS oblasti



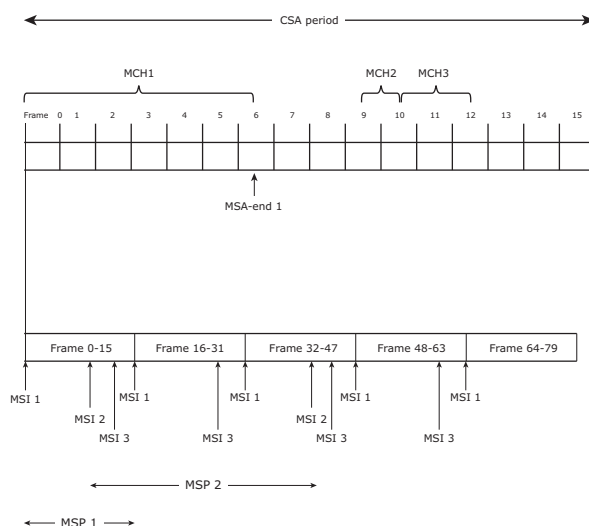
Slika 4.21: Ažuriranje MCCH informacije

Raspodela MBMS servisa

Svi MCH kanali koji su deo iste MBMS oblasti zauzimaju deo SFN-MBMS podfrejma CSA (Common Subframe Allocation), slika 4.22. Tokom prenosa kroz određeni MCH kanal, on prati alokaciju MCH podfrejma (MSA). MSA je periodičan na početku svakog MCH perioda raspodele (MCH Scheduling Period-MSP), a MAC kontrolni elemenat se koristi za prenos MCH raspodele informacija (MCH Scheduling Information-MSI). MSI ukazuje koji podfrejm se koristi za određeni MCH kanal u narednom periodu raspodele. Ovo nije bitno za sve moguće podfrejmove koji će biti upotrebljeni. Kada MCH kanali zahtevaju manji broj od alociranih MCH podfrejmova, MSI ukazuje na poslednji MCH podfrejm koji će biti upotrebljen za ovaj deo MCH (MSA end na slici 4.22), dok se ostali podfrejmovi ne upotrebljavaju za MBMS prenos. Različiti MCH podfrejmovi jedan za drugim se prenose unutar CSA perioda. Na taj način svi podfrejmovi upotrebljeni u MCH n -tom periodu raspodele prenose se pre podfrejmova koji su upotrebljeni u MCH $n + 1$ -vom periodu raspodele istog CSA perioda. Period raspodele (MSP1) sadrži 16 frejmova i traje jedan CSA period, a period raspodele informacije se prema tome prenosi na svakih 16 podfrejmova. Period raspodele za MSP2 je 32 frejma tj. traje dva CSA perioda i period raspodele informacije prenosi se na svakih 32 frejma, slika 4.22.

Procedure MBMS servisa

Mreža pruža MBMS servis jednom ili više UE-a u skladu sa sledećim redosledom:



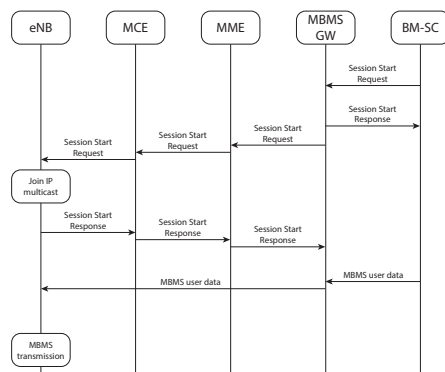
Slika 4.22: Raspodela MBMS frejma (preuzeto iz [5])

- kada počinje sesija MBMS servisa, eNB se povezuje sa MBMS servisom i počinje prenos MBMS podataka prema jednom ili više UE-a. Ovo predstavlja proceduru početka MBMS sesije (MBMS Session Start Procedure).
- kada je MBMS sesija počela, UE dobija MCCH informacije u vezi sa MBMS servisom i onda uspostavlja radio nosilac koji je povezan na MBMS servis, nazvan MBMS point-to-multipoint Radio Bearer (MRB). Kompletan tok poruke grupisan je u MCCH Information Acquisition and MRB Configuration Procedure.
- dok eNB prenosi sesiju jednom ili više UE-a, sesija može biti ažurirana (updated), npr. sa novom servisnom oblasti. Ova procedura se naziva ažuriranje MBMS sesije (MBMS Session Update Procedure).
- kada se završi sesija MBMS servisa, eNB napušta MBMS servis i zaustavlja prenos MBMS podataka prema jednom ili više UE-a. Ova procedura se naziva kraj MBMS sesije (MBMS Session Stop Procedure).
- kada se završi sesija MBMS servisa, UE prima ažuriranu MCCH infor-

maciju a zatim oslobađa MRB koja je povezana na MBMS servisom. Ova procedura se naziva oslobađanje MRB (MRB Release Procedure)

MBMS Session Start procedura

BMSC blok E-UTRAN-a započinje proceduru početka MBMS sesije MBMS servisa slanjem zahteva (Session Start Request message), slika 4.23. Procedura početka MBMS sesije aktivira jednu ili više eNB-a da se povežu na MBMS servis i započinje prenos MBMS korisničkih podataka prema UE-a. Pre započinjanja procedure početka MBMS sesije, BMSC blok daje MBMS servisu obaveštenje o UE-a koji podržavaju MBMS [107]. MBMS servis obaveštava UE-e koji su zainteresovani za MBMS servis da budu spremni za prijem. Kada sesija započne na radio interfejsu, zainteresovani UE-i su spremni za prijem MBMS korisničkih podataka putem MTCH kanala. Na početku sesije alocirana je IP multicast adresa i dodeljena odgovarajućim eNB-a putem Session Start Request message. Nakon primljene Session Start Request message, eNB-e se vezuju sa servisom i omogućavaju prijem MBMS korisničkih podataka od MBMS-GW bloka E-UTRAN-a. Zatim, eNB-e uspostavlja radio resurse (kao što su MBMS podfrejmovi) u pripremi za prenos MBMS korisničkih podataka UE-a. BMSC blok počinje slati MBMS korisničke podatke preko MBMS-GW bloka, posle procedure početka MBMS sesije. BMSC blok može primeniti zaštitno kodovanje (Forward Error Correction) za MBMS korisničke podatke. MBMS-GW blok koristi IP multicast protokol da prosledi primljene MBMS korisničke podatke do eNB-a koje su povezane na servis. BMSC blok treba da bude siguran jesu li MCE blok E-UTRAN-a i eNB spremni za SFN-MBMS prenos sesije (čekajući određeno vreme), pre slanja MBMS korisničkih podataka. eNB treba podesiti (konfigurisati) neophodne radio resurse i kanale. Takođe, ona emituje ažuriranu MCCH informaciju dobijenu od posmatrane sesije, pod kontrolom MCE bloka da bi SFN-MBMS prenos bio spreman. Posle prijema MBMS korisničkih podataka od MBMS-GW bloka, eNB emituje MBMS korisničke podatke na MTCH kanal koji je konfigurisan za posmatranu sesiju. Zatim, UE-i primaju MBMS korisničke podatke, ako su zainteresovani za datu sesiju.

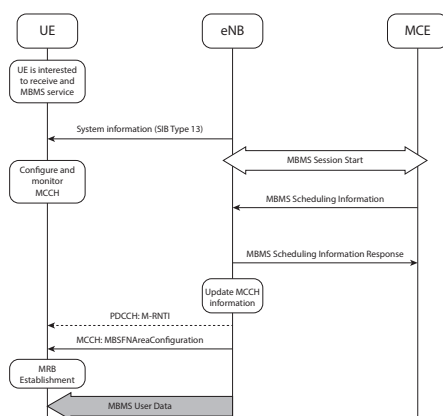


Slika 4.23: Session Start procedura (preuzeto iz [6])

MRB Configuration procedura

Početak sesije MBMS servisa, SFN-MBMS prenosi su koordinirani između eNB-a pod kontrolom MCE bloka E-UTRAN-a. Ovom koordinacijom MCE blok šalje MBMS Scheduling Information poruku eNB-a, slika 4.24. Ova poruka obuhvata ažuriranu MCCH informaciju kao što je konfiguracija odgovarajućeg MRB nosioca za tu sesiju. Vreme ažuriranja MCCH ukazuje kada eNB treba da upotrebi ažuriranu MCCH informaciju. Kada se primi MBMS Scheduling Information message za početak sesije, eNB-e ukazuju na MRNTI indikator preko PDCCH kanala kako bi prosledili informaciju UE-a u MCCH periodu izmene (eNB, MRNTI indikatorom preko PDCCH kanala, obaveštava UE-e o promeni MCCH informacije u jednom periodu izmene pre nego ažurirana MCCH informacija bude isporučena). Zatim, eNB ažurirane MCCH informacije šalje MCCH kanalu u sledećem MCCH periodu izmene, u skladu sa MCCH vremenom ažuriranja koju je dobila od MCE bloka. UE koji podržava MBMS servis prati PDCCH kanal upotrebom konfiguracije SIB13 (SIB (System Information Block) tip SIB13 u MBMS servisu obaveštava UE-e o konfiguraciji MCCH kanala i sadrži obaveštenja koja pruža PDCCH kanal). Prilikom ukazivanja PDCCH kanala na promenu MCCH informacije u SFN-MBMS oblasti održava vezu sa MBMS servisom i UE-i preuzimaju od MCCH kanala ažuriranu MCCH informaciju za SFN-MBMS oblast. Nakon toga UE uspostavlja MRB nosilac koja prati sesiju sa ažuriranom MCCH informacijom. Uspostavljanjem MRB nosioca, konfiguriraju se MTCH i PMCH kanali

koji odgovaraju tom MRB nosiocu. Kada je MRB nosilac uspostavljen UE može primiti MBMS korisničke podatke od MTCH kanala. Kretanjem UE-a kroz ćeliju između SFN-MBMS oblasti, UE prima MBMS korisničke podatke putem uspostavljenog MRB.



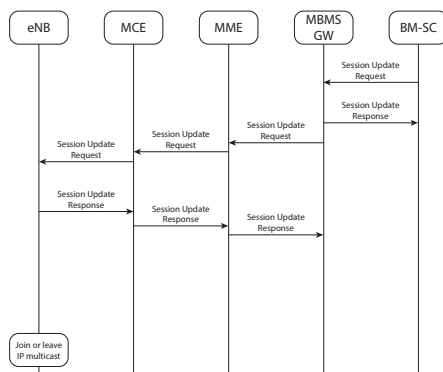
Slika 4.24: MCCH Information Acq. and MRB procedura (preuzeto iz [6])

MBMS Session Update procedura

BMSC blok može menjati karakteristike sesije (npr. MBMS oblast), dok MBMS sesija traje. Ova izmena uslovljava slanje MBMS Session Update Request poruke prema MCE bloku i eNB-a, slika 4.25. eNB koja je predhodno bila povezana na MBMS servis primanjem Session Update Request poruke, može napustiti servis. Odnosno nova eNB može se povezati na servis u sesiji koja traje, zbog izmene MBMS servisne oblasti u toku sesije. Napuštanjem servisa eNB oslobađa konfiguraciju radio resursa i kanala. Samim tim UE-i napuštaju nadležnog MRB nosioca.

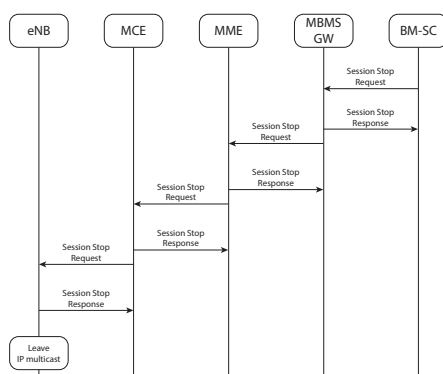
MBMS Session Stop procedura

BMSC blok prekida sesiju kada više nema MBMS korisničkih podataka za sesiju MBMS servisa. U tom slučaju poruka MBMS Session Stop Request šalje se MCE bloku i eNB-a, slika 4.26. Primanjem MBMS Session Stop Request poruke, eNB koja je povezana sa ovom sesijom napušta servis da



Slika 4.25: MBMS Session Update procedura (preuzeto iz [6])

bi se onemogućio prijem MBMS korisničkih podataka od MBMS-GW bloka. Kada eNB napusti servis, oslobađa konfiguraciju radio resursa i kanala za ovu sesiju. Zaustavljanjem sesije UE-i napuštaju nadležnog MRB nosioca.

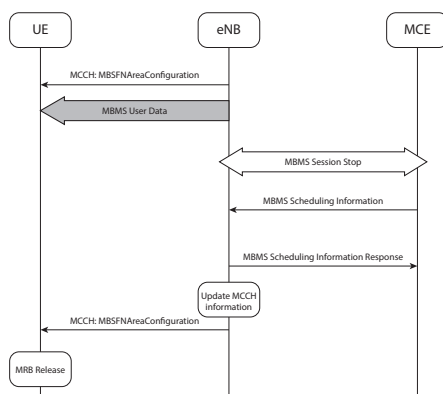


Slika 4.26: MBMS Session Stop procedura (preuzeto iz [6])

MRB Release procedura

Zaustavljanjem sesije MCE blok šalje MBMS Scheduling Information poruku do eNB-va koje učestvuju u ovom SFN-MBMS prenosu, slika 4.27. Primanjem MBMS Scheduling Information poruke eNB ažurira MCCH informaciju za nadležnu SFN-MBMS oblasti zaustavlja SFN-MBMS prenos za MRB

koja je odgovarajuća u toj sesiji. UE-i servisa periodično primaju MCCH informaciju od SFN-MBMS oblasti koja je u vezi sa MBMS servisom. UE prepoznaje Session Stop poruku ažurirane MCCH informacije. On smatra sesiju koja se odnosila na pomenutu MRB zaustavljenom, kada nema konfiguracije kanala za uspostavljenu MRB u MCCH informaciji. UE raskida vezu sa uspostavljenom MRB sesije: kada je sesija zaustavljena, kada UE napušta SFN-MBMS oblasti koja je u vezi sa MBMS servisom, kada UE nije u mogućnosti da primi sesiju MBMS servisa jer trenutno ima servis većeg prioriteta [6], [99].



Slika 4.27: MRB Release procedura (preuzeto iz [6])

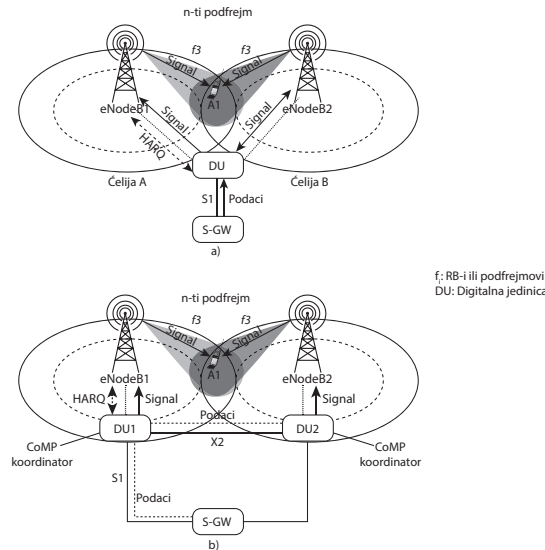
Unapređenja MBMS servisa (Release 10 i 11)

Release 10 i 11 predstavljaju poboljšanja MBMS (evolved MBMS-eMBMS). U Release 10 UE-a je putem SFN-eMBMS podfrejma omogućena isporuka unicast prenosa. Takođe, SC-eMBMS prenos prevazilazi prethodne LTE MBMS nedostatke, pružajući UE-a povratne informacije o uslovima kanala i dinamičkom izboru pogodne adaptivne modulacije i kodovanja AMC (Adaptive Modulation and Coding). Prednost ove sheme je dinamička adaptacija na tekuću raspodelu UE-a u ćeliji i mogućnost isključenja u ćelijama koje nemaju UE-e. SFN-eMBMS prenos, predstavlja koordinisani pokušaj makro eNB-a da pokriju mrežu sa istim fizičkim signalom. U tom slučaju fiksna AMC shema je prilagođena najgorem mogućem UE-m zahtevu (tj. UE-a koji su daleko uda-

ljeni od eNB ili se nalaze na ivicama ćelije). SFN-eMBMS servis je za razliku od SC-eMBMS fiksna, unapred dizajniran i ne zavisi od raspodele UE-a u ćeliji [108]. SFN-eMBMS primenjuje CoMP (Coordinated Multipoint Transmission) tehniku koja omogućava među-ćelijsku saradnju sa ciljem poboljšanja propusnog opsega UE-a i smanjenja ICI na ivicama ćelije. Tradicionalno, UE pristupa samo jednoj ćeliji za komunikaciju. Međutim, CoMP dozvoljava UE-u komunikaciju sa više ćelija (tzv. CoMP cooperating cells) i one direktno ili indirektno prenose podatke do UE-a. Postoje dve vrste CoMP tehnika prenosa Joint Processing (obuhvata Joint Transmission/Dynamic Point Selection) i Coordinated beamforming/scheduling.

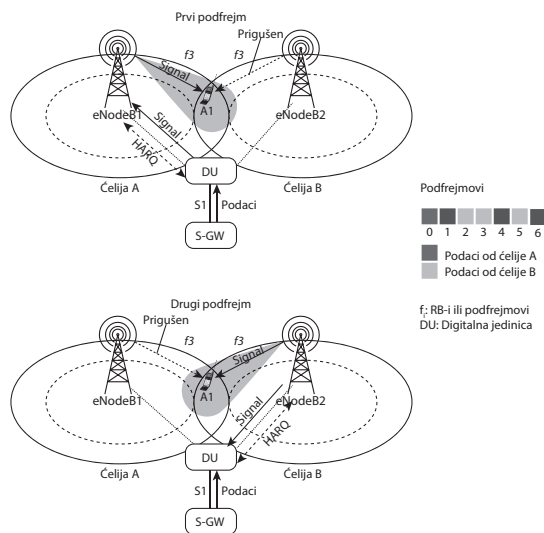
Joint Transmission (JT) tehnikom više ćelija prenosi iste podatke istovremeno koristeći iste radio resurse (vremenske i frekvencijske). Prenosom istih podataka protok se ne udvostručava, ali prijemne performanse će biti poboljšane. Prenos podataka se realizuje kao intra eNB (ista eNB vrši prenos na ivicama ćelija), slika 4.28a i inter eNB (više eNB-a vrši prenos na ivicama ćelija), slika 4.28b. Intra eNB šalje podatke od digitalne jedinice (Data Unit-DU) u eNB1 i eNB2. Inter eNB ima distribuiranu i centralizovanu arhitekturu. Distribuiranom arhitekturom IP podaci se šalju iz DU1 do DU2, a signalni podaci se šalju iz DU1 do eNB1 i iz DU2 do eNB2. UE na ivici ćelije dobija podatke od svoje servisne ćelije A i iste podatke dobija od ćelije B. Ovim pristupom signal koji se dobija od ćelije B ne prouzrokuje smetnje već jača kvalitet signala na UE-u. Na ovaj način propusnost u ćeliji se značajno poboljšava. Dynamic Point Selection (DPS) u fazi pripreme radi na isti način kao i JT (tj. više ćelija dele iste podatke), ali u fazi prenosa podataka funkcioniše drugačije. Odnosno, CQI (indikator informacije o kvalitetu kanala) UE-a se proverava na svakom podfrejmu, a podatke šalje samo ćelije koja ima minimalan path loss. Ostale ćelije koje nisu izabrane su prigušene. Slanjem podataka iz ćelije sa najboljim CQI, kvalitet prijema na UE-u može se najefikasnije poboljšati. Na slici 4.29 je prikazano kako DPS CoMP radi: ćelije A i B međusobno saraduju alocirajući iste frekvencijske resurse (f_3) UE-a, deljenjem i dinamičkim slanjem istih podataka u svakom podfrejmu, koristeći ćeliju sa minimalnim path loss-om.

Coordinated beamforming (CB) i Coordinated scheduling (CS) značajno utiču na smanjenje ICI odabirajući jednu ćeliju (iz grupe ćelija koje saraduju)



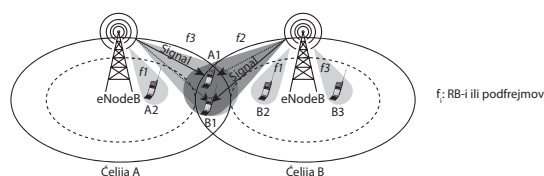
Slika 4.28: Intra i inter Joint Transmission

za komunikaciju sa UE-m. Osnovna ideja CS CoMP-a koja utiče na smanjenje ICI je alociranje različitih frekvenzijskih resursa (RB-a ili podnosilaca) UE-a koji se nalaze na ivici ćelije. Na slici 4.30 ćelije A i B međusobno saraduju alocirajući različite frekvenzijske resurse (f_3 , f_2) do UE A1 i UE B2. Međutim, UE A1 osim podataka koji su namenjeni njemu prima i podatke namenjene UE B2 i obratno. Ovi signali ne prouzrokuju interferenciju na UE-a, ali mogu da oslabe signale na njihovom prijemu. U odnosu na CS CoMP, CB CoMP alocira različite prostorne resurse (beam patterns-deo snopa signala) usmerene ka UE-u na ivici ćelije pomoću tehnologije pametnih antena. Kada CB CoMP radi samostalno, može se desiti da UE A1 i UE B2 dobiju iste frekvenzijske resurse (f_3), slika 4.31. CB CoMP omogućava ćelijama A i B međusobnu saradnju, alociranjem različitih prostornih resursa (beam pattern1 i beam pattern2) do UE A1 i UE B2. Ove dve ćelije sprečavaju interferenciju izdvajanjem glavnog loba (main beam) do njihovih zajedničkih UE-a i potisnutog loba (null beam) do drugih UE-a. CB CoMP obično radi u paru sa CS CoMP, slika 4.32. Ćelije A i B saraduju međusobno alociranjem različitih frekvenzijskih resursa (f_1 , f_2) i različitih prostornih resursa (beam pattern1 i beam pattern2). Ova saradnja je veoma efikasna, jer CS CoMP rešava problem interferencije, a CB



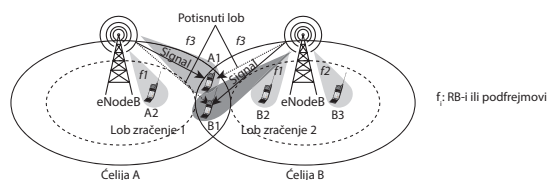
Slika 4.29: Dynamic Cell Selection

CoMP obezbeđuje bolji kvalitet prijema UE-a. Upotrebom CS CoMP sa CB CoMP, CS CoMP postiže bolju propusnost na ivicama ćelije. Odnosno CB CoMP pomaže UE A1 i UE B2 da izbegnu signale poslate od drugih UE-a i bolji prijem signala predodređenih za sebe. [109].

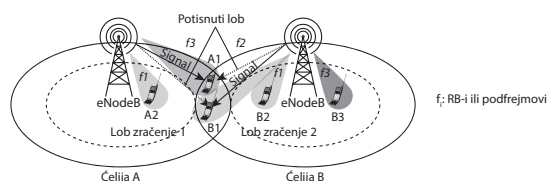


Slika 4.30: Coordinated scheduling

U Release 10 3GPP poboljšava MBMS sa MBMS Counting procedurom. MBMS Counting procedura dozvoljava MCE bloku E-UTRAN-a prebrojavanje UE-a povezanih na MBMS servis u kompletnoj SFN-eMBMS oblasti. Zavisno od rezultata MBMS Counting procedure, MCE blok može obustaviti ili ponovo uspostaviti MBMS servis u kompletnoj SFN-eMBMS oblasti. MCE blok zahteva pokretanje MBMS Counting procedure slanjem MBMS Service Counting Request poruke prema eNB-i, slika 4.33. Primanjem MBMS Service



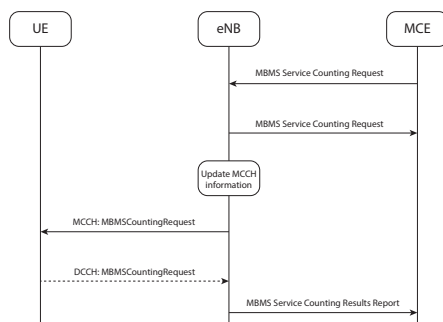
Slika 4.31: Coordinated beamforming



Slika 4.32: Coordinated beamforming/scheduling

Counting Request poruke, RRC sloj eNB-e pokreće MBMS Counting proceduru slanjem MBMSCountingRequest putem radio interfejsa. MBMSCountingRequest poruka se emituje MCCH kanalom. Kada UE primi MBMSCountingRequest poruku on treba da bude u RRC-CONNECTED. U odnosu na MBMS counting UTRAN-a, UE-i u RRC-CONNECTED E-UTRAN-a ne izvršavaju uspostavljanje RRC-CONNECTED zbog MBMS Counting procedure. Odnosno, upotrebom MBMS Counting procedure E-UTRAN prebrojava samo RRC-CONNECTED UE-e koji su zainteresovani za MBMS servis. Međutim, E-UTRAN na osnovu broja RRC-CONNECTED procenjuje broj RRC-IDLE.

U Release 11 3GPP dodatno poboljšava MBMS podrškom za kontinuitet MBMS servisa. Na taj način, mreža dodeljuje UE-a informacije mapiranja između frekvencije nosioca i MBMS servisa i vremenskog intervala prenosa MBMS servisa. Na osnovu ovih informacija, UE koji je zainteresovan za servis (UE je u RRC-IDLE), samostalno podešava frekvenciju nosioca MBMS servisa na najviši ćelijski ponovo izabrani prioritet za predviđeno vreme. UE će ponovo izabrati ćeliju sa frekvencijom nosioca MBMS servisa. Takođe u Release 11 kada je UE u RRC-CONNECTED, MBMSInterestIndication porukom obaveštava servisnu ćeliju o frekvenciji nosioca, gde je prenos MBMS servisa od interesa.



Slika 4.33: MBMS Counting procedura (preuzeto iz [6])

4.3 Energetska i spektralna efikasnost u heterogenim ćelijskim mrežama

eNB-e potroše oko 57% energije tipične ćelijske mreže [110]. Ogromna potražnja za velikim protokom podataka UE-a svrstala je eNB-e u dominantne potrošače ukupne energije u MCN-a. Pokazano je da se potrošnja energije LTE mreže mora povećati oko 60 puta u odnosu na 2G mrežu, kako bi ponudila isti nivo pokrivenosti [111]. Na osnovu toga, većina analiza energetske efikasnosti (Energy Efficiency) u MCN-a fokusirana je prema eNB-a. Energetska efikasnost eNB-e postala je glavni faktor prilikom projektovanja MCN-a. Većina napora koji su učinjeni za smanjenje potrošnje energije usmerena su na proizvodnju hardvera, odnosno njegovu izradu, raspodelu i funkcionisanje. Postoje dva načina povećanja energetske efikasnosti u MCN-a. Prvi se sastoji od smanjenja potrošnje energije glavnog potrošača (eNB-e), odnosno energetski efikasniji hardveri i napredniji softveri koji trebaju prilagoditi potrošnju energije u odnosu na okolnosti u prenosu. Tako su autori u radovima [112] i [113] analizirali eNB-e koje podrazumevaju efikasnije korišćenje pojačavača i prirodnih resursa za hlađenje. Međutim, važno je uspostaviti ravnotežu između potrošnje energije i performansi sistema u mreži. Drugi način ima inteligentnije razvijenu mrežnu strategiju, gde se raspodelom velike gustine eNB-e male snage smanjuje potrošnja energije u odnosu na raspodelu male gustine makro eNB-e velike snage. Ključni princip je sledeći: eNB koja je bliža UE-u snižava potrebnu predajnu snagu, zbog smanjenja path loss-a [114].

4.3.1 Proračun energetske efikasnosti

Proračun energetske efikasnosti svrstan je u dve kategorije: apsolutne pokazatelje koji ukazuju na stvarnu potrošnju energije za ostvarenje komunikacionih servisa i relativne pokazatelje koji pokazuju kako je energetska efikasnost poboljšana. U literaturi koristi se nekoliko načina za izračunavanje energetske efikasnosti. Najčešće se koristi izračunavanje koje je definisano kao odnos ukupnog mrežnog protoka i potrošnje energije u određenom periodu [115]:

$$E_c = \frac{R}{P} \quad (4.1)$$

gde je R prosečan protok podataka (bits/s) od određene eNB-e za uloženu snagu P (Watt) i merna jedinica je bits/s/w (biti po sekundi po watt-u). Takođe, merna jedinica može da bude u bits/Joules (bita po džulu), ako je snaga P u Joules/s. Ovaj pokazatelj opisuje efikasnost pouzdanog prenosa bita od predajnika do prijemnika po jedinici utrošene energije. Za pokrivanje ćelijske oblasti, ova jedinica modifikovana je kao bits/J/unit area (biti po džulu po jedinici površine), čime je obuhvaćen stepen pokrivenosti površine [116]. Potrošnja energije u uređajima može se podeliti na dva dela: statička i dinamička potrošnja energije. Statički potrošnja energije je energija za održavanje uređaja, nezavisno od procesa prenosa. Dinamička potrošnja energije je potrebna energija za proces prenosa. Međutim, standardizovani energetske pokazatelji su obično varijacije sledeće dve osnovne definicije: potrošnja energije se označava sa ECR (Energy Consumption Ratio), a telekomunikaciona energetska efikasnost sa $TEER$ (Telecommunications Energy Efficiency Ratio) [112], [117]. ECR se definiše kao odnos maksimalne snage (u watt-ima) i maksimalne količine isporučenih bita:

$$ECR = \frac{E}{M} = \frac{P \cdot T}{M} = \frac{P}{R} \quad (4.2)$$

gde je E energija potrebna da se dostavi M bita tokom vremena T i $R = M/T$ je prosečan protok podataka bits/s (bit po sekundi). ECR predstavlja potrošnju energije u džulima utrošenu za prenos jednog informacionog bita i procenjuje potrošnju celokupne pristupne mreže RAN. U svakoj ćeliji ECR pretpostavlja određenu prosečnu snagu eNB-e i određen prosečan protok [112]. Na taj način ECR je zapravo inverzna verzija jednačine 4.1. Sistem sa nižim

ECR-om je efikasniji u korišćenju energije od sistema sa većim ECR-om, jer svaki bit zahteva malo potrebne energije za prenos. TEER je opštiji od *ECR* odnosa i zapisuje se kao $TEER = (\text{koristan rad/snagu})$. Npr. ako uzmemo da je koristan rad jednak broju prenetih bita, onda je $TEER=1/ECR$ ili upravo jednačina 4.1. Takođe, moguće je snagu u izrazima predstaviti u dB ili dBm i prilagoditi ECR i TEER metriku na odgovarajući način. Ova mogućnost nije trenutno razmatrana u standardima. Standardi obično nisu eksplicitno odredili definicije snage koje se koriste za izračunavanje ECR i TEER [112].

4.3.2 Proračun spektralne efikasnosti

Klasičan kriterijum optimizacije bežične mreže je prostorna spektralna efikasnost (Area Spectral Efficiency, sa mernom jedinicom bit/s/Hz/m^2) [118]. Pozivajući se na prostornu spektralnu efikasnost, autori u radu [119] predložili su idejno rešenje za meru potrošnje energije MCN-e, koja je definisana kao:

$$\rho = \frac{P}{A} \quad (4.3)$$

gde je P snaga utrošena na oblast pokrivenosti A u MCN-i, sa mernom jedinicom W/m^2 . Potrošnja energije ne može biti isključivi pokazatelj koji opisuje energetske efikasnost, jer ne uzima u obzir informacioni protok ili spektralnu efikasnost SE (Spectral Efficiency) koju isporučuje mreža. Ipak, ovakav način izračunavanja omogućava procenu energetske efikasnosti različitih mrežnih topologija sa sličnim performansama [120]. U cilju sagledavanja energetske efikasnosti mreže (u odnosu na njenu veličinu), autori rada [115] uvode pojam prostorne energetske efikasnosti AEE (Area Energy Efficiency) koja je definisana kao $\text{bit/Joule/jedinica površine ćelije}$. AEE za određenu eNB-u može se izraziti kao:

$$A_{EE} = \frac{E_e}{A} \quad (4.4)$$

gde E_e predstavlja energetske efikasnost u bit/Joule i A oblast pokrivenosti određene površine u km^2 .

4.3.3 Odnos energetske efikasnosti i spektralne efikasnosti

Spektralna efikasnost je pokazatelj performansi u širokoj upotrebi za projektovanje MCN-e. Na primer, spektralna efikasnost downlink-a 3GPP po-

većala se u intervalu od $0.05 - 5 \frac{\text{bits}}{\text{s}\cdot\text{Hz}}$ od perioda GSM do LTE sistema. Definisanje energetske efikasnosti u komunikacionom sistemu nije jednostavan problem, a teorija informacija koja definiše odgovarajuće mere u prenosu informacija može biti od koristi i u definicijama energetske efikasnosti. Na osnovu Shannon-ove formule kapaciteta kanala [121], a prema [122] i [7], spektralna efikasnost i energetska efikasnost komunikacionog sistema zasnovanog na kanalu sa belim aditivnim Gausovim šumom (AWGN) može se napisati:

$$\eta_{SE} = \frac{R}{B} = \log_2\left(1 + \frac{P}{BN_0}\right) \quad (4.5)$$

$$\eta_{EE} = \frac{R}{P} = \left(\frac{B}{P}\right) \cdot \log_2\left(1 + \frac{P}{BN_0}\right) \quad (4.6)$$

gde je R protok informacije u bitima, P je snaga na prijemu, B je propusni opseg i N_0 spektralna gustina snage šuma. Iz odnosa spektralne efikasnosti i energetske efikasnosti dobijamo:

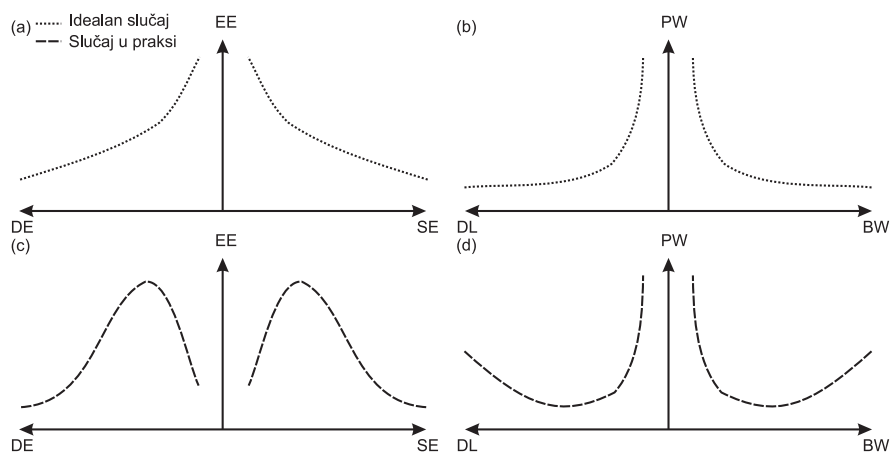
$$\eta_{EE} = \frac{\eta_{SE}}{(2^{\eta_{SE}} - 1) \cdot N_0} \quad (4.7)$$

Jedinica energetske efikasnosti je bit/Joule koja ukazuje na prenos jedinice informacije po jedinici energije. Jednačina (4.6) daje model energetske efikasnosti za opšti komunikacioni sistem. Ona pokazuje, ako je N_0 fiksno, onda je energetska efikasnost funkcija spektralne gustine snage P/B , ali η_{EE} monotonno ne raste sa B ili P . U praktičnom sistemu gde je propusni opseg manje fleksibilan parametar, teško je postići maksimalnu vrednost energetske efikasnosti u sistemu. Upotrebom većeg propusnog opsega, za datu vrednost protoka R , zahteva se manje snage. U slučaju neograničnog propusnog opsega snaga asimptotski teži ka vrednosti $P = N_0 \cdot R \cdot \ln 2$. Na ovaj način ostvaruje se veza propusnog opsega i energije. Optimizacija performansi protoka podataka obično je u suprotnosti sa povećanjem energetske efikasnosti. Uravnotežavanjem ova dva parametra komplikuje se projektovanje sistema. Energetska efikasnost MCN-e zavisi od rastojanja, frekvencije nosioca, efikasnosti antene itd. Međutim, uticaj ISI i fedinga dovode do zavisnosti energetske efikasnosti MCN-e od sredine kroz koju se signal prostire [122], [7]. Iz jednačine (4.7), η_{EE} teži konstantnoj vrednosti, $1/(N_0 \cdot \ln 2)$ kada η_{SE} teži nuli. Suprotno, η_{EE} teži nuli kada η_{SE} teži beskonačnosti [7].

Još jedan važan pokazatelj performansi mreže mobilnih operatera je efikasnost raspodele (Deployment Efficiency). Troškovi raspoređivanja se sastoje od CAPEKS (investicioni) i OPEKS (operativni) troškova. Efikasnost raspodele može se definisati kao efikasnost raspodele eNB-e i energetske efikasnosti za procenu efikasnosti korišćenja energije. Odnos efikasnosti raspodele i energetske efikasnosti nije jednostavan i postaje složeniji kada se razmatraju praktični aspekti. Nije uvek moguć kompromis u praksi između ove dve efikasnosti, ako zavise od načina raspodele eNB-e. U skladu sa tim projektovanje energetske efikasne arhitekture treba u potpunosti da obuhvati analizu energetske efikasnosti tj. proširiti je na ceo sistem, a ne samo na eNB-u [7]. Potrošnja energije takođe mnogo zavisi od količine raspoloživog spektra. Značajne uštede troškova u energiji i infrastrukturi mogu bitno uticati na uštedu ukupnih troškova u koliko je više spektra dostupno [123]. Autori u radovima [122], [7] odredili su četiri ključna kompromisa energetske efikasnosti sa performansama mreže:

- efikasnost raspodele - energetska efikasnost (uravnotežava troškove raspoređivanja, protoka i energije u mreži),
- spektralna efikasnost - energetska efikasnost (uravnotežava ostvaren protok i potrošnju energije),
- propusni opseg - snaga (uravnotežava upotrebljeni propusni opseg i snagu potrebnu za prenos),
- i kašnjenje - snaga (uravnotežava prosečno end-to-end kašnjenje servisa i prosečnu potrošnju snage u prenosu).

Uz pomoć ova četiri kompromisa, autori su pokazali povezanost ključnih pokazatelja mreže (performansa/potrošnja). Slika 4.34a i slika 4.34b pokazuju odnos kompromisa četiri krive u idealnom slučaju a slika 4.34c i slika 4.34d u praktičnoj primeni [122], [7]. Kako bi se povećala energetske efikasnosti u budućim bežičnim mrežama a time se održala i profitabilnost, od ključnog je značaja razmotriti: energetska efikasnost bežične arhitekture i protokola, pametne mreže, efikasan redizajn eNB-a, prosleđivanje paketa i HetNets gde je raspodela zasnovana na manjim ćelijama.



Slika 4.34: Prikaz kompromisa četiri krive za idealan slučaj i slučaj u praksi (EE-energetska efikasnost, DE-efikasnost raspodele, SE-spektralna efikasnost, PW-snaga, DL-kašnjenje, BW-propusni opseg, preuzeto iz [7])

4.3.4 Analiza energetske efikasnosti u heterogenim ćelijskim mrežama

Autori rada [124] predstavili su projekat pod naslovom Energy Aware Radio and Network Technologies (EARTH). Ovaj projekat ima za cilj identifikovanje koncepta koji će dodatno poboljšati energetska efikasnost bežične mreže. Pokazana je optimizacija energetske efikasnosti na nivou sistema, koja se u osnovi može unaprediti promenom u projektovanju eNB-a, zajedno sa uvođenjem novog pratećeg koncepta fizičkog sloja. Auer i grupa autora [116] predložili su metod izračunavanja energetske efikasnosti downlink-a 3GPP LTE mreže. Njihovi rezultati otkrili su da je potrošnja energije uglavnom nezavisna od opterećenja prenosa u mreži. To jasno ukazuje na postojanost velikog potencijala za uštedu energije poboljšanjem energetske efikasnosti eNB-a male snage.

Analiza energetske efikasnosti makro i mikro ćelijskog nivoa

Upotrebom HetNets (makro i mikro eNB-a) može se postići ušteda potrošnje energije bez optimizacije lokacija mikro ćelija, za određenu prosečnu

oblast spektralne efikasnosti i ravnomernu raspodelu UE-a [119]. U radu [114], autori su predstavili način optimizacije strukture ćelija u mreži uzimajući u obzir prosečan broj mikro ćelija po makro ćeliji i veličinu samih makro ćelija. Promenom broja makro i mikro ćelija postižu se slične performanse sistema i pod punim opterećenjem. Arnold i grupa autora [120] su merenjem potrošnje energije eNB-a u okviru GSM-a i UMTS-a razvili modele snage za makro i mikro eNB-e, jednačine (4.8 i 4.9). Potrošnja u eNB-i sastoji se iz dva dela. Prvi deo opisuje statičku potrošnju (kada eNB nije aktivna) a drugi deo opisuje dinamičku potrošnju (kada je eNB aktivna), jednačine (4.10 i 4.11). Elementi tipične eNB-e koji predstavljaju ukupnu potrošnju energije su: pojačavač snage PA, procesor, analogno digitalni konvertor (A/D), antena, napojni vod, napajanje, rezervna baterija, hlađenje. Prelazak sa eNB-e bez opterećenja na opterećenu eNB-u doprinosi samo povećanju od 2% – 3% u ukupnoj potrošnji električne energije [125]. Autori u radu [126], prilagodili su model potrošnje energije promenljivom opterećenju MCN-e i dokazali su da je potrebno još dodatnih mikro eNB-a za bolju energetska efikasnost u slučaju veće gustine UE-a. Analiza je sprovedena za energetska efikasnost u HetNets sa ravnomerno (uniformnom) raspodeljenom potrošnjom MCN-e. Pokazano je kako se potrošnja energije može smanjiti uključivanjem i isključivanjem eNB-a kao i usklađivanjem dnevnih promena potrošnje MCN-e. U radu [127] autori se fokusiraju na efekat slučajne upotrebe mikro eNB-a sa promenljivom gustinom u MCN-i. Oni su na taj način razmatrali efikasnost korišćenja energije kao i zavisnosti ICI koje mogu nastati usled protoka u različitim oblastima.

$$P_{BS,Macro} = N_{Sector} \cdot N_{PApSec} \cdot \left(\frac{P_{TX}}{\mu_{PA}} + P_{SP} \right) \cdot (1 + C_{PSBB}) \quad (4.8)$$

$$P_{BS,Micro} = P_{static,Micro} + P_{dynamic,Micro} \quad (4.9)$$

$$P_{static,Micro} = \left(\frac{P_{TX}}{\mu_{PA}} \cdot C_{TX,static} + P_{SP,static} \right) \cdot (1 + C_{PSBB}) \cdot (1 + C_{PS}) \quad (4.10)$$

$$P_{static,Micro} = \left(\frac{P_{TX}}{\mu_{PA}} (1 - C_{TX,static}) \cdot C_{TX,NL} + P_{SP,NL} \right) \cdot N_L \cdot (1 + C_{PS}) \quad (4.11)$$

Kada se zahteva veći protok u MCN-i, raspodela mikro eNB-a povećava energetska efikasnost MCN-e povećanjem prostorne spektralne efikasnosti. Međutim, makro eNB-e u tom slučaju služe samo za pokrivanje oblasti između

mikro eNB-a, ali sa daleko manjim utroškom snage. U radovima [127], [128] autori porede različite načine raspodele snaga za OFDMA sistem sa *reuse* faktorom jednakim 1, tj. upotrebom istog frekvencijskog opsega u celoj mreži. Tombaz i grupa autora u [129] dali su pregled različitih tehnika koje uključuju: novu dostupnost spektra, efikasnije implementacije fizičkog sloja, definisane strategije za različite raspodele eNB-a i backhaul kako bi se smanjili ukupni troškovi sistema. U svojim strategijama razvoja mreže, oni su naglasili potrebu da se prilagodi dizajn mikro eNB-a zahtevanom protoku u mreži. Ovim se obezbeđuje ukupna ušteda energije makro eNB-a koje koriste veću snagu napajanja [123].

Analiza energetske efikasnosti makro i piko ćelijskog nivoa

Piko ćelije imaju manju oblast pokrivenosti i predstavljaju eNB-e sa manjom snagom napajanja (red veličine 0,2 W) od konvencionalnih makro ćelija. One su obično opremljene sa neusmerenim antenama i često se raspoređuju unutar prostorija ili u spoljašnjoj sredini i postavljaju se planski (hot-spot) [130]. Piko ćelije se mogu smatrati dobrom opcijom mreže u smislu postizanja veće propusnosti uz prihvatljive troškove energije. Ušteda energije uz pomoć piko ćelija za stambene UE-e razmatrana je u [131]. Energetska efikasnost kroz različite nivoe simulacija u sistemu dva tipa MCN-a sa makro i piko ćelijama pokazani su u [115]. Oblast energetske efikasnosti može se poboljšati primenom piko ćelija u kombinaciji sa smanjenjem prenosa kroz makro ćelije (ovaj koncept naziva se offloading i popularno je rešenje za energetska efikasnost u heterogenim MCN-a). U međuvremenu, novi model potrošnje energije (po uzoru na [119]) razmatra backhaul za MCN-e i predlaže [123]:

$$P_i = a_i P_{tx} + b_i \quad (4.12)$$

gde P_{tx} predstavlja snagu predajne eNB-e, a a_i i b_i su parametri dobijeni merenjem na terenu. Simulaciona analiza pokazala je da backhaul ima veliki uticaj u tri različite raspodele HetNets: makro, makro i piko, makro i WLAN [129].

Analiza energetske efikasnosti makro i femto ćelijskog nivoa

Femto ćelije su mrežni čvorovi raspoređeni (neplanski) za unutrašnju primenu (digitalna pretplatnička linija ili kablovski modem) sa mrežnim backhaulom. Femto ćelije su obično opremljene neusmerenim antenama i njihova predajna snaga je 100 mW ili manje [130]. Kao što je navedeno u [132] femto ćelije predstavljaju energetske efikasno rešenje za unutrašnju pokrivenost u LTE-A MCN-a. Algoritmi za kontrolu snage mogu se primeniti u slučajevima kada sistem ne uspeva ostvariti svoju odgovarajuću SNR vrednost snižavanjem snage prenosa najjačih interferentnih ćelija kako bi se smanjila interferencija između različitih klasa eNB-a [133].

Glava 5

Dizajn i analiza eMBMS servisa u LTE/LTE-A mrežama

Na osnovu definisane komunikacije između eNB-e i UE-a izborom: modela prostorne raspodele eNB-e i UE-a, modela prostiranja signala, standarda i servisa za prenos korisničkog sadržaja, pristupa se analizi servisa koji nudi dati sistem. Osnovni cilj jeste dizajniranje adekvatnog sistema koji će omogućiti isporuku sadržaja sa traženim kvalitetom servisa uz minimalan utrošak energije. U ovom poglavlju, posmatračemo različite realizacije eMBMS servisa u LTE/LTE-A mrežama i izvršiti njihova analiza.

5.1 Dizajn i analiza eMBMS servisa u LTE/LTE-A mrežama primenom 3GPP heksagonalnog modela

5.1.1 Model sistema za emitovanje video sadržaja u LTE/LTE-A mrežama

3GPP eMBMS mobilni video broadcast servisi zahtevaju značajne resurse za visokokvalitetnu isporuku video servisa sa visokom verovatnoćom pokrivenosti. Dominacija korisničkih zahteva za isporukom video sadržaja u ćelijskom mobilnom Internetu otvara veliki izazov za operatere MCN-a. Od njih se traži da obezbede odgovarajući kapacitet MCN-a, koji zadovoljava korisničke zahteve i smanjuje potrošnju energije. eMBMS se, kao i svi ostali servisi u LTE mrežama, isporučuje ka UE-a kao IP paketski tok podataka. IP paketi se prenose preko radio-interfejsa (ostvaruje komunikaciju između eNB-e i UE-a) u okviru vremensko-frekvencijskih resursa, koji su alocirani za multicast/broadcast kanal koji preuzimaju UE-i koji su prijavljeni na eMBMS servis. Podsećamo da je za standardne unicast IP servise, alokacija vremensko-

frekvencijskih resursa deo MAC scheduler-a eNB-e, i on ovu raspodelu vrši na osnovu:

- zahtevanog propusnog opsega tj. kategorije LTE uređaja
- uslova u kanalu koje je izmerio svaki UE i kao feedback informaciju (CQI-Channel Quality Indicator) vratio eNB-i.

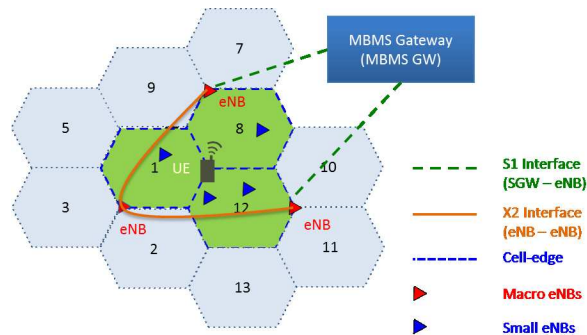
Za razliku od unicast servisa, standardan multicast/broadcast video servis, primenjuje fiksnu fizičku shemu prenosa sa ciljem globalne pokrivenost ćelije bez obzira na pojedinačne uslova kanala (CQI vrednosti UE-a). Tabela 5.1.1 sadrži podatke vezane za CQI vrednosti i odgovarajuće veličine TB-a. U analizama koje slede pretpostavljamo kategoriju UE-a “jedan” za LTE ($N_{RBP} = 6$). Efikasno projektovanje isporuke video sadržaja preko LTE/LTE-A mreža zavisi od tačnosti modelovanja trenutnih uslova kanala i ostvarenog protoka podataka prema UE-a na različitim lokacijama ćelije.

CQI stanje	modulation	code rate	bita po simbolu	SINR (dB)	TB (bita)
0 – 3	No Tx	-	-	< -1.25	0
4	QPSK	0.3	0.6016	-0.94	384
5	QPSK	0.44	0.8770	1.09	576
6	QPSK	0.59	1.1758	2.97	768
7	16QAM	0.37	1.4766	5.31	960
8	16QAM	0.48	1.9141	6.72	1152
9	16QAM	0.6	2.4063	8.75	1536
10	64QAM	0.45	2.7305	10.47	1920
11	64QAM	0.55	3.3223	12.34	2304
12	64QAM	0.65	3.9023	14.37	2688
13	64QAM	0.75	4.5234	15.94	3072
14	64QAM	0.85	5.1152	17.81	3456
15	64QAM	0.93	5.5547	20.31	3840

Tabela 5.1: CQI vrednosti i odgovarajuće veličine TB.

Model sistema za LTE/LTE-A mreže

Posmatran je fiksni heksagonalan (na nivou sektora) LTE/LTE-A mrežni model sistema koji se sastoji od 19 makro ćelijskih oblasti (sa eNB-m u ćošku tri sektora koji čine ćeliju), koje su raspoređene u dva nivoa oko centralne ćelije (slika 2.4, sekcija 2.1.1). Analiza je usmerena na centralnu ćeliju i slučajnu raspodelu dodatnih mikro i piko ćelija, unutar oblasti koju pokriva centralna ćelija (sektori 1, 8, 12 na slici 5.1). eMBMS servis pruža usluge preko dela frekvencijskih resursa (npr. fiksni skup izdvojenih PHY RB) bilo pomoću SC-eMBMS ili SFN-eMBMS sistema.



Slika 5.1: LTE/LTE-A model sistema za SC i SFN- eMBMS servis

UE-i postavljeni na rastojanju d od eNB-e imaju prosečan SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) na strani UE-a [134]:

$$SINR(d) = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - N - I - S(d) - PL(d) - PNL \quad (5.1)$$

gde je P_{TX} snaga eNB-e (po sektoru ćelije), G_{TX} i G_{RX} su dobici antena eNB-e i UE-a (uključujući 3GPP definisane horizontalne i vertikalne dijagrame antena); N i I su smetnje usled šuma i ICI (međućelijske interferencije); S i PL su gubici usled shadowing i pathloss u dB (mereni na različitim pozicijama UE-a koristeći shadowing i pathloss modele definisane u tabeli 5.1.1; PNL (Penetration Loss) je gubitak koji se prouzrokuje prolaskom kroz zid za signale koje prima UE u zatvorenom prostoru [134].

ICI faktor I zavisi koje od dve eMBMS strukture su u upotrebi. Kod SC-eMBMS sistema snaga primljenog signala od svih eNB-a, osim najjače,

Parameter	Value
ISD	500 m (3GPP Case 1)
Model prenosa	Downlink full buffer
Duplex mod	FDD
Propusni opseg sistema	2 x 40 MHz (LTE-A)
Dodela eMBMS servisa	25%
Udaljenost između nosilaca	15 kHz
Broj RBs/TTI	100 RBPs po 10 MHz
Trajanje OFDMA simbola	0.133 ms
Broj OFDMA symb/frame	6 po subframe
Broj RBPs po TTI	100 RBPs
Kontrolno zaglavlje MBMS	10 %
Prenosna shema	SISO
Trajanje frejma	10 ms
Frekvencija nosioca	2.0 GHz
Struktura sistema	multi-cell (19 macro-cells) HetNets (micro+pico cells)
Pathloss	eNB-UE 3GPP model
Penetration loss (PNL)	20dB
Shadowing:	makro, mikro, piko
Shadow fading:	Log normal
Std deviation:	eNB-UE: (10, 10, 6) dB
Brzina korisnika	3km/h
Max Tx snaga: makro, mikro, piko	eNB: (46, 22, 16) dBm/sector
Max dobitak antene: makro, mikro, piko	eNB: (14, 9, 5) dBi, UE: 0 dBi
Visina antene: makro, mikro, piko	eNB: (25, 5, 1.5) m, UE: 1.5 m
Noise figure	UE: 7 dB
Max. broj HARQ retransmisija	3

Tabela 5.2: Parametri LTE/LTE-A mreže

doprinosi faktoru ICI. Primenom posebnih propusnih opsega za makro, mikro i piko eNB-e, samo eNB-e iz iste klase čine međusobno interferenciju. U slučaju SFN-eMBMS sistema susedne eNB-e podržavaju jedna drugu i koherentno se prenosi isti signal u istom frekvencijskom opsegu. Zbog kompleksnosti sinhronizacije, pretpostavljamo da klaster od tri najjače eNB-e pruža koristan signal, dok ostale eNB-e čine faktor ICI [135].

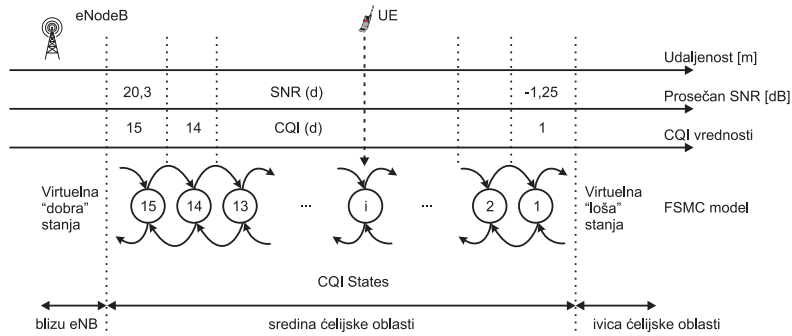
Model LTE/LTE-A downlink kanala na nivou paketa

eMBMS servis koristi standardan IP-bazirani LTE prenos preko eNB-UE interfejsa koji se svodi na prenos niza fizičkih TB-a u okviru vremensko-frekvencijskih RB-a koji prenose IP sadržaj. Na dalje, posmatramo jednostavan model prenosa TB-a u cilju pružanja razumne procene ostvarivog protoka podataka za UE-e koji se nalaze u domenu ćelija SC-eMBMS ili SFN-eMBMS uslužnog servisa. Proces prenosa modela TB-a zahteva:

- opis procesa izveštavanja CQI vrednosti od svakog UE-a ka eNB-i
- procenu greške pri prenosu TB-a (ovo se tipično naziva BLER - Block Error Rate) za različite CQI vrednosti (verovatnoća greške prenosa PHY TB posmatrano sa MAC sloja)

Upotrebili smo FSMC model kanala [76] za modelovanje CQI vrednosti i njihovu dinamiku korišćenja. Zbog jednostavnosti, pretpostavljamo Rayleigh-jevu statistiku fading kanala i fiksnu frekvencijsku dodelu PHY RB-a tokom vremena (TTI intervala) sa dovoljno niskom mobilnošću UE-a i disperzijom (rasipanjem) multipath signala. Na taj način, paketske gubitke TB-a kanala možemo modelovati upotrebom sporo promenljivog frekvencijski ravnog Rayleigh-jevog fadinga FSMC modelima [72], [74]. Ovi modeli su nadograđeni sa specifičnim aspektima LTE/LTE-A mreže, podela SINR na intervale u okviru FSMC modela definisana je podelom SINR na odgovarajuće CQI intervale (tabela 5.1.1, kolona SINR). Samim tim, oni su prilagođeni za realizaciju LTE/LTE-A modela downlink kanala, drugim rečima, mi izvršavamo “ugradnju” LTE podele SINR na intervale u FSMC modelu [74]. Poboljšanje definisanja uspešnosti prenosa PHY TB-a (za UE-e koji su u blizini eNB-e ili na ivici ćelije) rešavamo dinamičkim uvođenjem dodatnog skupa virtuelnih stanja (dobrih i loših). “Dobra” virtuelna stanja ugrađuju se za $SINR > 20.31$ dB (tj.

za CQI stanje veće od 15 i isporuka PHY TB-a je bez grešake, $BLER = 0$). “Loša” virtuelna stanja ugrađuju se za $SINR < -1.25$ dB (tj. za CQI stanje manje od 0 i PHY TB-a je pogrešno prenesen, $BLER = 0$), slika 5.2.



Slika 5.2: Proces prenosa PHY TB u FSMC modelu

Na osnovu prosečnog $SINR(d)$ UE-a (jednačina 5.1) i SINR intervala CQI stanja, realizuje se FSMC model. Ovakav model, na osnovu lokacije UE-a, daje izveštaj o njegovom CQI stanju. Važan element FSMC modela su verovatnoće prelaska stanja $t_{k,k-1}$, $t_{k,k+1}$ i $t_{k,k}$ (sekcija 3.2.5). Upotrebom modela [74] i shodno tome da je pretpostavljen Rayleigh-jev fading, verovatnoće prelaska stanja date su formulama 3.27 i 3.28 (sekcija 3.2.5). Koristeći predhodno dobijeni FSMC model, lako se može izračunati skup $\pi = \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{N_{CQI}}$ stacionarnih verovatnoća CQI stanja N_{CQI} . Prosečan protok podataka prema UE-u u i -tom CQI stanju iznosi:

$$R_i = \frac{TBS(i) \cdot N_{RBP}}{TTI} (1 - BLER(i)), \quad (5.2)$$

gde je $TB(i)$ (Transport Block Size) kapacitet informacije fizičkog TB (u bitima, tabela 5.1.1, kolona TB), N_{RBP} je broj parova RB-a, TTI obuhvata vreme trajanje intervala uzastopnih sekvenci i $BLER(i)$ je prosečan BLER za i -to CQI stanje. $BLER(i)$ se izračunava težinskim usrednjavanjem simuliranih BLER vrednosti prenosa PHY TB preko fizičkog kanala, pri čemu se usrednjavanje vrši u N_S podstanja (ekvidistantnih SINR tačaka) u okviru SINR

intervala i -tog CQI stanja:

$$BLER(i) = \sum_{j=1}^{N_S} P(j) \cdot BLER^{(sim)}(j). \quad (5.3)$$

gde je $P(j)$, $1 \leq j \leq N_S$, verovatnoća raspodele podstanja, koja se dobija iz trenutne SINR raspodele verovatnoća stanja normalizovanog SINR intervala i -tog CQI stanja [74]. $BLER^{(sim)}(j)$ je j -to podstanje BLER, dobijeno simulacijama na fizičkom sloju [136]. $R_{avg}(d)$ predstavlja prosečan protok dostavljanja podataka (PHY TB-a) UE-u koji se nalazi na rastojanju d od eNB-e i izračunava se kao:

$$R_{avg}(d) = \pi \cdot \mathbf{R}^T, \quad (5.4)$$

gde je $\mathbf{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_{N_{CQI}}\}$. Ovi protoci odgovaraju komunikaciji sa jednim UE-m (unicast prenos), gde eNB neprekidno prilagođava AMC shemu na osnovu izveštaja o vrednosti CQI stanja UE-a. Međutim, isti princip izračunavanja BLER-a važi za komunikaciju sa više UE-a (multicast prenos), gde eNB primenjuje fiksnu AMC shemu. U tom slučaju, pretpostavljamo da eNB primenjuje AMC shemu koja odgovara CQI vrednosti "s", gde skup vrednosti iz R čine: $R_i = R_s$, za $i \geq s$, dok je $R_i = 0$ za sve ostale. Drugim rečima, UE-i čiji je izveštaj CQI vrednosti veći ili jednak sa "s" dobiće podatke putem fiksnog servisnog protoka R_s , dok ostali UE-i ne dobijaju podatke.

Prosečan protok i verovatnoća pokrivenosti za SFN-eMBMS servis

SFN-MBMS servis vrši isporuku svim eNB-a koristeći isti skup parametara fizičkog nivoa koji zadovoljavaju željenu verovatnoću pokrivenosti ćelije sa pragom $P_{th}^{(cov)}$. Verovatnoća pokrivenosti servisa definiše se kao verovatnoća uniformno i slučajno raspodeljenog UE-a u domenu proizvoljne eNB-e ćelije prelazi minimalni SINR prag potreban za kvalitetnu isporuku servisa. Generalno, tačno izračunavanje verovatnoće pokrivenosti je složeno [49], a u našem modelu koristi se aproksimacija modelovanja FSMC kako bi se dobile razumne procene (objašnjenje aproksimacija sledi u nastavku). Pretpostavljamo da eNB-a emituje sadržaj koristeći fiksnu AMC shemu koja je izabrana unapred i odgovara određenoj unapred izabranoj vrednosti CQI stanja. Prosečna primljena vrednost SINR za svakog pojedinog UE-a u ćeliji je poznata (jednačina 5.1). Ubacivanjem prosečnog SINR u FSMC model, dobija se skup od

π stacionarnih verovatnoća CQI stanja UE-a, iz čega sledi jednostavan izraz za verovatnoću pokrivanja posmatranog UE-a pri zadatoj AMC shemi koju koristi eNB:

$$P_{UE,s}^{(cov)} = \sum_{i \geq s} \pi_i, \quad (5.5)$$

Izračunavanjem prosečne vrednosti $P_{UE,s}^{(cov)}$ UE-a u oblasti koju pokriva ćelija, dobija se verovatnoća pokrivenosti ćelije. Zbog jednostavnosti uvedene su dve pretpostavke:

1. prosečan SINR je cirkularno simetričan u odnosu na eNB-u
2. oblast ćelije predstavlja krug poluprečnika r_c

Prva pretpostavka: “ograničava radijalne linije koje izlaze iz eNB-e” (proštiranje talasa signala). Bira se “najlošije” pozicionirana radijalna linija (najmanja vrednosti SINR), čime se efektivno smanjuje granica verovatnoće pokrivenosti, tj. rezultujuća procena je konzervativna i predstavlja donju granicu na stvarnu vrednost (lower bound). Druga pretpostavka: “koristi krug minimalnog poluprečnika koji obuhvata sve sektore i time su obuhvaćeni svi UE-i koje opslužuje data eNB”. Na kraju, verovatnoća pokrivenosti se aproksimira sa “Riemann - like” težinskim usrednjavanjem verovatnoće pokrivenosti lociranog UE-a iz niza N_r koncentričnih prstenova definisanih skupom ekvidistantnih poluprečnika $\mathbf{d} = \{d_1 = 0, d_2, \dots, d_{N_r+1} = r_c\}$, gde je $d_{i+1} - d_i = r_c/N_r$. Verovatnoća pokrivenosti ćelije iznosi:

$$P_{c,s}^{(cov)} = \sum_{i=1}^{N_r} P_h(d_i : d_{i+1}) \cdot P_{UE}^{(cov)}(d_{i+1}), \quad (5.6)$$

gde je $P_h(d_i : d_{i+1})$, verovatnoća UE-a postavljenog uniformno i slučajno u ćelijsku oblast kružnog oblika u granicama $[d_i, d_{i+1}]$, dok je $P_{UE}^{(cov)}$ verovatnoća da je UE pozicioniran na radijalnoj liniji na rastojanju d od eNB-e pokriven. $P_h(d_i : d_{i+1})$ je definisana kao:

$$P_h(d_i : d_{i+1}) = \frac{d_{i+1}^2 - d_i^2}{r_c^2}. \quad (5.7)$$

Ako je $P_{c,th}^{(cov)}$ željeni prag verovatnoće pokrivenosti, SFN-MBMS servis za svoje emitovanje treba koristiti najviše CQI stanje s^* čija vrednost verovatnoće pokrivenosti $P_{c,s^*}^{(cov)}$ premašuje vrednost $P_{c,th}^{(cov)}$:

$$s^* = \max\{s \in CQI : P_{c,s}^{(cov)} \geq P_{c,th}^{(cov)}\}, \quad (5.8)$$

gde CQI predstavlja skup indeksiranih CQI stanja. Tako, SFN-MBMS servis postiže prosečan protok:

$$R_{s^*}^{SFN} = \frac{TBS(s^*) \cdot N_{RBP}}{TTI} (1 - BLER(s^*)), \quad (5.9)$$

dok je $P_{c,th}^{(cov)}$ uslovna vrednost (vrednost praga).

Prosečan protok i verovatnoća pokrivenosti za SC-eMBMS servis

SC-eMBMS servis omogućava malom broju UE-a u ćeliji bolju servisnu isporuku (veći protok podataka) od isporuke koju koristi SFN-MBMS [137]. Pretpostavljamo uniformnu slučajnu prostornu raspodelu UE-a, poznatu i kao Poisson-ova raspodela intenziteta λ UE-a po jedinici površine, gde je prosečan protok SC-MBMS servisa izveden za datu verovatnoću pokrivenosti $P_{c,th}^{(cov)}$. Objašnjenje SC-eMBMS servisa započinjemo inverznim problemom: za dati $P_{c,th}^{(cov)}$ i fiksno CQI stanje s , traži se poluprečnik r_s takav da ako eNB emituje sadržaj putem AMC sheme za CQI stanje s , UE-i unutar kružnice poluprečnika r_s dobijaju servisnu uslugu uz uslov $P_{c,s}^{(cov)} \geq P_{c,th}^{(cov)}$. Povećanjem vrednosti CQI stanja s između $s^* < s < N_{CQI}$, gde je s^* CQI stanje koje pokriva kompletnu ćeliju, dobija se skup poluprečnika $\mathbf{r} = \{r_{N_{CQI}}, r_{N_{CQI}-1}, \dots, r_{s^*+1}\}$ (veće CQI vrednosti odgovaraju manjim poluprečnicima). Svi poluprečnici definišu region verovatnoće pokrivenosti $P_{c,th}^{(cov)}$, za odgovarajuće CQI stanje. Na primer, za CQI stanje s , dobija se r_s uz neznatno izmenjenu verziju jednačine (5.6):

$$P_{c,s}^{(cov)} = \sum_{i=0}^n P_h(d_i : d_{i+1}) \cdot P_{UE}^{(cov)}(d_{i+1}), \quad (5.10)$$

gde je u jednačini (5.10) cilj da se proceni n . Tačnije, povećavanjem n povećava se skup ekvidistantnih prstenova definisanih skupom poluprečnika $\mathbf{d} = \{d_1 =$

$0, d_2 = \delta, d_3 = 2\delta, \dots, d_n = (n-1)\delta$ u prsten-po-prsten konstrukciji (a ring-by-ring fashion-prstenovi se nadovezuju jedan na drugi, imaju isti centar samo se d uvećava), sve dok verovatnoća pokrivenosti $P_{c,s}^{(cov)}$ ne pređe $P_{c,th}^{(cov)}$:

$$n(r_s) = \min\{n \in N : P_{c,s}^{(cov)} \geq P_{c,th}^{(cov)}\}. \quad (5.11)$$

U zavisnosti od izabranog faktora prirasta poluprečnika δ , dobija se proizvoljno dobra procena $r_s = n(r_s) \cdot \delta$. Koristeći \mathbf{r} i gustinu UE-a λ , izračunava se verovatnoća da se svih i UE-a u ćeliji nalazi u okviru poluprečnika r_j . U takvom slučaju (svi UE-i u dometu r_j), SC-MBMS servis obezbeđuje protok podataka R_j tako što eNB emituje signal definisan AMC shemom CQI stanja j , garantujući minimalnu verovatnoću pokrivenosti $P_{c,th}^{(cov)}$ za sve UE-e u ćeliji. Prosečan protok SC-eMBMS servisa koji ostvaruje eNB dobija se usrednjavanjem po broju UE-a u ćeliji između mogućeg broja UE-a u ćeliji i CQI stanja koje pripada odgovarajućoj oblasti (definisanom poluprečnikom pokrivanja), čime se dobija:

$$R^{SC}(\lambda) = \sum_{i=1}^{N_u} \sum_{j=s^*}^{N_{CQI}} P_\lambda(i) \cdot P_h(i, r_j) \cdot (1 - P_h(i, r_{j+1})) \cdot R_j. \quad (5.12)$$

U jednačini (5.12), $P_\lambda(i)$ opisuje Poisson-ovu raspodelu:

$$P_\lambda(i) = \frac{(\lambda A)^i}{i!} \exp(-\lambda A), \quad (5.13)$$

gde je i broj UE-a u ćeliji kao funkcija prosečne gustine UE-a λA , A oblast ćelije, pri čemu je ukupan broj UE-a u ćeliji limitiran na neku dovoljno veliku vrednost N_u . $P_h(i, r_j)$ je verovatnoća da je svih i UE-a, postavljenih uniformno i slučajno unutar kružne oblasti ćelije, istovremeno “upalo” unutar kruga poluprečnika r_j . $P_h(i, r_j)$ definiše se:

$$P_h(i, r_j) = \left(\frac{r_j}{r_c}\right)^{2i}, \quad (5.14)$$

R_j je prosečno postignut protok po UE-u dobijen iz jednačine (5.2).

Jednačina (5.12) definiše prenos podataka eNB-e protokom R_j prema svim UE-a koji se nalaze unutar prstena poluprečnika r_j . U slučaju da se neki od njih nalaze unutar manjeg prstena r_{j+1} eNB će povećati protok prenosa na R_{j+1} . U odnosu na protok SFN-MBMS servisa ($R_{s^*}^{SFN}$), prosečan protok SC-MBMS servisa ($R^{SC}(\lambda)$) zavisi od raspodele UE-a na osnovu prosečnog broja UE-a po jedinici površine λ .

5.1.2 Evaluacija propusnog opsega i energetska efikasnost isporuke video sadržaja eMBMS servisom u LTE/LTE-A

Različitim načinom rada sistema za prenos podataka i prosečnim protocima koji su na raspolaganju servisima za emitovanje video sadržaja (video broadcasting service), dobijaju se pokazatelji stepena iskorišćenja sistema u pogledu propusnog opsega i potrošnje energije. Ovi parametri se računaju po jedinici servisa koji je realizovan u ovoj disertaciji, predstavljaju eMBMS video kanale konstantnog protoka. Evaluacija energetske efikasnosti eMBMS servisnih jedinica oslanja se na modele potrošnje energije eNB-a. Rezultat dobijene energija po kanalu može se shvatiti kao novi parametar koji nazivamo Energija Servisa (Energy of Service-EoS). EoS može biti od fundamentalnog značaja za vrednovanje i poređenje različitih servisnih arhitektura i izbor jedne optimalne strukture u odnosu na ukupne troškove energije. Takva struktura treba da zadovolji i specifičan QoS–zasnovan na zahtevima korisnika.

Kapacitet i propusni opseg isporuke video sadržaja broadcasting servisom

Prosečan broj eMBMS video kanala za dati prosečan protok servisa i konfiguraciju sistema dobija se kao [138]:

$$N_{eMBMS}^{cfg} = \frac{N_{RBP}^{(DL)} \cdot F_{eMBMS}^{(DL)} \cdot (1 - \alpha_{eMBMS}) \cdot R_{th\%}^{cfg}}{R_{eMBMS}}. \quad (5.15)$$

U jednačini (5.15), $N_{RBP}^{(DL)}$ predstavlja broj PHY RB-a alociranih za isporuku eMBMS video servisa, $F_{eMBMS}^{(DL)}$ je deo OFDM simbola LTE frejma izdvojenih za isporuku eMBMS servisa. α_{eMBMS} je deo kontrolnih podataka koje zahteva eMBMS servis ($\alpha_{eMBMS} = 10\%$ [138]), $R_{th\%}^{cfg}$ je ukupan prosečan protok isporuke podataka pri datoj konfiguraciji sistema (*cfg*), (*cfg* može biti SFN-eMBMS ili SC-eMBMS servis) potrebnog da se postigne prag (*th%*) pokrivenosti ćelije, dok je R_{eMBMS} protok podataka jednog eMBMS kanala (npr., 384, 768 ili 1536 kbit/s) [138]. Zavisno od broja eMBMS kanala, konfiguracija sistema je u stanju obezbediti, na osnovu date alokacije frekvencija $N_{RBP}^{(DL)}$, raspodelu propusnog opsega (u kHz) po eMBMS kanalu:

$$B_{MBMS}^{cfg} = \frac{N_{RBP}^{(DL)} \cdot 180}{N_{MBMS}}. \quad (5.16)$$

Energetska efikasnost isporuke video broadcasting servisa

Analiza energetske efikasnosti SFN i SC-eMBMS servisa u LTE/LTE-A započinje prvo definisanjem odgovarajućeg modela potrošnje energije makro eNB-e, na osnovu kojih se dobijaju direktni troškovi energije po eMBMS kanalu. Model snage makro eNB-e sastoji se od dinamičke i statičke komponente (4.9). Dinamički deo zavisi od prosečne potrošnje eNB-e utrošene tokom prenosa i trenutnog opterećenja saobraćaja. Statički deo (ili nula-opterećenje), ne zavisi od parametara dinamičke komponente, već predstavlja potrošnju energije u rashladnim uređajima (cooling sections), primopredajniku (base-band and radio) i interfejsima [139],[140]. Makro model potrošnje snage eNB-e u [140] opisan je relacijom između radom utrošene (operativne) snage P_{Op}^{eNB} eNB-e i maksimalne prenosne snage $P_{Tx,max}^{eNB}$:

$$P_{Op}^{eNB} = \alpha P_{Tx,max}^{eNB} \cdot l + \beta, \quad (5.17)$$

gde su P_{Op}^{eNB} i $P_{Tx,max}^{eNB}$ dati u watt-ima (W), l je vrednost opterećenja isporuke servisa u opsegu od 0 (bez opterećenja) do 1 (maksimalno opterećenje). α je konstanta koja opisuje energetska efikasnost pojačavača eNB-e (PA-Power Amplifier), jedinica za napajanje itd., dok je β vrednost opterećenja kada nema potrošnje snage makro eNB-e. Izabrane su vrednosti $\alpha = 2.85$ W i $\beta = 6.02$ W, na osnovu dostupnih podataka energetske efikasnosti po uzoru na trenutno najaktuelnije komponente makro eNB-e [141].

Na osnovu broja eMBMS kanala i date raspodele frekvencija $N_{RBP}^{(DL)}$ dobija se potrošnja energije (ili snage) po eMBMS kanalu sistema:

$$P_{MBMS}^{cfg} = \frac{P_{Op}^{eNB} \cdot N_{RBP}^{(DL)}}{N_{MBMS}^{(tot)}}. \quad (5.18)$$

gde je $N_{MBMS}^{(tot)}$ ukupan broj RB-a koji su na raspolaganju eNB-i.

Proširenje LTE/LTE-A strukture na heterogene mreže

U skladu sa tekućom evolucijom od makro ćelijskih do HetNet mreža, povećava se potencijal za pružanje kvalitetnijih usluga video servisa. HetNets su zasnovane na evoluiranoj E-UTRAN strukturi koja pruža nove mogućnosti za poboljšanja u mobilnim isporukama video sadržaja kroz eMBMS servis.

Karakteristične su tehnike “offloading” od makro ćelije prema malim ćelijama (UE-i se konektuju na najbližu ćeliju (manje snage), umesto na udaljeniju ćeliju (veće snage) ili dinamičkom kontrolom napajanja “cell-zooming” malih ćelija. Glavni problem za energetska efikasnost uz pomoć E-UTRAN strukture je kako se uvođenje malih ćelija odražava na E-UTRAN potrošnju energije. SC-eMBMS servis se u daljoj analizi dodatno proširuje sa eNB-a koje pripadaju mikro i piko ćelijama. Utvrdili smo, za određenu raspodelu ćelija, da UE koji troši servis ima bolju konekciju preko susednih eNB-a malih ćelija u odnosu na vezu prema makro eNB-i. Takođe pretpostavljamo određen broj mikro i piko eNB-a, koje su slučajno raspodeljene prema Poisson-ovom procesu. Svakoj klasi eNB-a (makro, mikro i piko) dodeljuje se poseban i nezavisan skup PHY RB-a. Evaluacija potrošnje energije, za makro eNB-e, realizuje se jednačinom (4.8) modela potrošnje snage. Jednačinom (4.8) posmatra se po svakom sektoru jedna makro eNB. Vrednosti parametara su: broj pojačavača po sektoru $N_{PA} = 1$, ukupna prenosna snage eNB $P_{TX} = 40$ W, efikasnost pojačavača $\mu_{PA} = 0.15$, snaga disipacije signala $P_{SP} = 73.5$ W, gubici hlađenja $C_C = 0.28$ i pomoćno napajanje $C_{PSBB} = 0.11$ su preuzeti iz UMTS modela [120]. Model potrošnje mikro eNB-a, koristi jednačine (4.9, 4.10 i 4.11) i parametre iz [120], dok se za model potrošnje snage piko eNB-a koristi jednačina (4.12) i parametari iz [123].

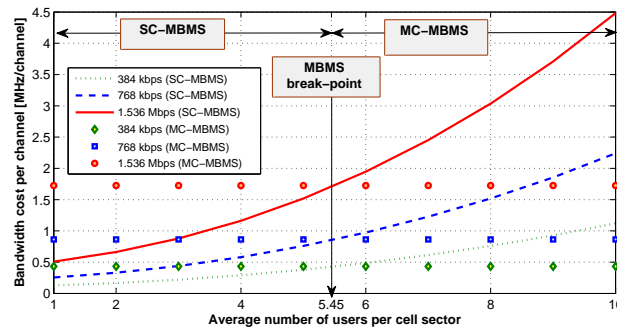
5.1.3 Analiza isporučenog protoka i energetska potrošnja u SFN- eMBMS i SC- eMBMS servisima

Koristeći metodologiju zasnovanu na FSMC sistemu modelovanja predstavljenu u sekciji (5.1.1), a primenom prosečnog protoka servisa izvedenu u istoj sekciji izračunava se propusni opseg i utrošena energija po jedinici servisa, kao što je navedeno u sekciji (5.1.2). Prosečni protoci prenosa podataka realizovani su za obe konfiguracije sistema SFN i SC-MBMS (sekcija 5.1.1 i tabela 5.1.1) uz pomoć parametara R_s^{SFN} i $R^{SC}(\lambda)$ (jednačine 5.9 i 5.12). Rezultati dobijeni za SC-eMBMS su funkcija gustine UE-a λ . Zatim, protok i utrošak energije po fiksnom protoku MBMS kanala za obe konfiguracije dobijaju se na osnovu jednačina (5.16 i 5.18).

Slike 5.3 i 5.4 predstavljaju zavisnost propusnog opsega (u [MHz/kanalu]) i utroška energije (u [J/kanalu]) od prosečne gustine UE-a po ćeliji λA do-

wmlink kanala (broadcast isporuku video sadržaja). Protoci SFN-eMBMS i SC-eMBMS servisne prenosne sheme su: 384, 768 i 1536 kbit/s. Rezultati predstavljaju direktno poređenje dve različite LTE-A eMBMS konfiguracije u odnosu na propusni opseg i utrošenu energiju servisa. Kao što se vidi iz rezultata, SC-eMBMS servis je pogodniji za malu gustinu UE-a, posebno za vrednosti gustine manje od 5.45 UE-a po ćeliji. Pored toga, SC-eMBMS servis pruža mogućnost isključivanja eNB-e kada u ćeliji nema UE-a radi uštede energije. Ova mogućnost je dodatno naglašena na slici 5.4 za protok eMBMS kanala od 1.536 Mbit/s i faktorom utroška energije $P_\lambda(0)$.

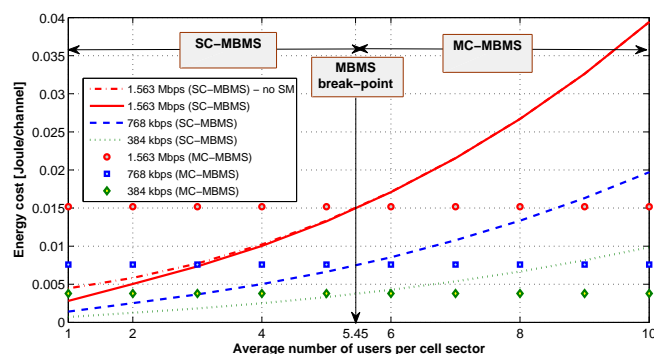
SFN-eMBMS servis povećava efikasnost isporuke u graničnom pojasu ćelije (na ivici) i ogleda se u boljim performansama kada je gustina UE-a veća. Može se primetiti da jednostavni analitički alati predloženi u ovom poglavlju daju veoma dobre simulacione rezultate koji su slični sa rezultatima u 3GPP ([142], [143], [144]), koji su takođe dobijeni putem simulacija.



Slika 5.3: Propusni opseg (u MHz/channel) za SC i SFN-eMBMS servis.

SC-eMBMS isporuka sadržaja preko LTE/LTE-A HetNets-a

SC-eMBMS konfiguracija proširena je sa slučajno raspodeljenim mikro i piko ćelijama (gde je N_μ i N_p njihov ukupan broj) i UE-a (N_{UE} je broj UE-a) u kružnu oblast radijusa R_C unutar zone pokrivanja centralne makro eNB-e. Pretpostavljamo da svi UE-i biraju tačku konekcije, eNB (makro, mikro ili piko), koja obezbeđuje najveći prosečan SINR. U svakom simulacionom ciklusu ($N = 1000$ -ukupan broj ciklusa) izračunavaju se frekvencijski resursi

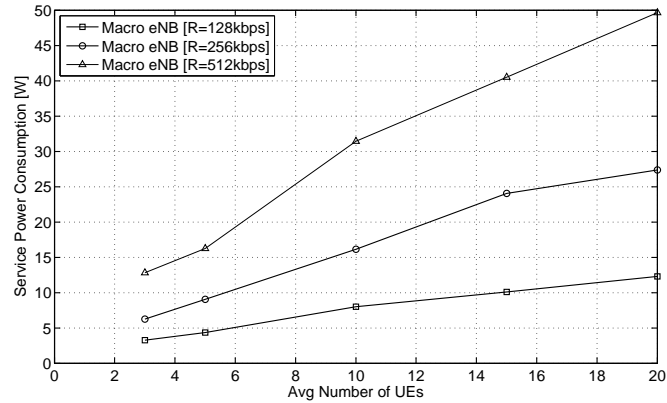


Slika 5.4: Potrošnja energije (u Joule/channel) za SC i SFN-eMBMS servis.

koji se izdvajaju redom, kako bi se isporučio eMBMS servis ukupnog protoka R [kbit/s]. Drugim rečima, pošli smo od pretpostavke da su sve eNB-e obaveštene o svim korisnicima servisa i njihovim SINR vrednostima. Na osnovu ove informacije eNB izdvađa “najlošijeg” slučajnog UE-a (ima najmanju SINR vrednost). Koristeći jednačine (5.2 i 5.4) u funkciji N_{RBP} , izračunavamo minimalnu količinu frekvencijskih resursa $N_{RBP}^{(eNB)}$. Ovi resursi moraju se raspodeliti tako da prosečan protok servisa R_{min}^{eNB} “najlošijeg” UE premašuje protok servisa R (drugim rečima, da je i najlošiji UE pokriven eMBMS servisom protoka R). Ukupna utrošena snaga eNB-e, na usluge eMBMS servisa, dobija se na osnovu ukupnog izraza za snagu dinamičke komponente sa količinom resursa koje koristi eMBMS servis za svaku eNB-u.

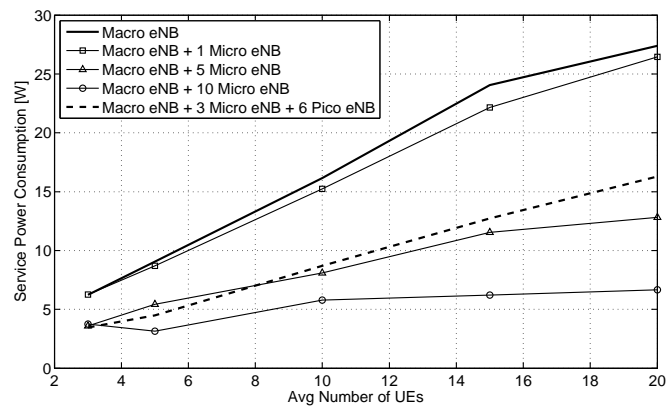
Slika 5.5 predstavlja scenario koji je postignut na osnovu makro eNB-e. Simulacioni rezultati na slici ilustruju linearnu aproksimaciju ukupne potrošnje energije u ćeliji za tri fiksna protoka eMBMS servisa (128, 512 i 512 kbit/s) u zavisnosti od gustine UE-a. Sa grafika se vidi, ako gustina UE-a u ćeliji raste, veća je verovatnoća da će UE biti u ivičnoj oblasti ćelije. Povećanjem protoka servisa i gustine UE-a, raste potrošnja snage.

Slika 5.6 realizovana za protok eMBMS servisa od $R=256$ kbit/s i raspodelu $N_{\mu} = \{1, 5, 10\}$ mikro eNB-e. Grafici jasno pokazuju poboljšanje energetske efikasnosti u zavisnosti od povećanja gustine raspodele mikro ćelija prilikom fiksno protoka servisa. U slučaju većeg broja mikro ćelija, isporuka eMBMS servisa (pokrivenost ćelije) sa zahtevanim protokom podataka daje dovoljno dobre rezultate potrošnje energije, koja ostaje skoro konstantna sa

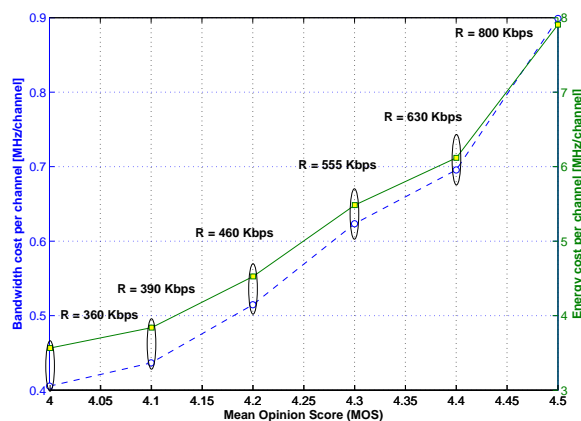


Slika 5.5: Potrošnja energije (u Joule/channel) za SC-eMBMS servis.

povećanjem gustine UE-a. Na slici 5.6, realizovan je scenario kombinacijom makro/mikro/piko raspodele eNB-a. Ilustrovana konfiguracija, osim centralne makro eNB-e ima slučajno raspodeljene $N_\mu = 3$ mikro i $N_p = 6$ piko eNB-a. Ispostavlja se da je dobijena potrošnja energije, za fiksni protok $R=256$ kbit/s eMBMS servisa, slična kao u slučaju $N_\mu = 5$ mikro eNB-a. Na taj način se određeni nivo potrošnje energije po kanalu servisa može dobiti korišćenjem različitih HetNets konfiguracija.



Slika 5.6: Prosečna potrošnja energije eMBMS servisa za različite HetNets konfiguracije u funkciji gustine UE-a ($R=256$ kbit/s).



Slika 5.7: Propusni opseg i utršak energije po jedinici servisa video kanala (video kanal MOS).

Kvalitet eMBMS servisne konfiguracije

U prethodnoj analizi, izvršena je evaluacija eMBMS kanala sa fiksnim protokom podataka bez razmatranja prosečnog kvaliteta video podataka koji se prosleđuju UE-u. U tom cilju, uvodimo subjektivni kvalitet korišćenja servisa (Quality of Experience-QoE) kao dodatni uslov u projektovanju eMBMS sistema. Koristimo noviji predloženi QoE model za H.264 Scalable Video Coder (H.264/SVC) servise [145] koji pruža analitičku vezu između prosečnog protoka podataka $R(q, t)$ i prosečnog subjektivnog video kvaliteta na osnovu Mean Opinion Score (MOS). $Q(q, t)$ zavisi od glavnih parametara H.264/SVC kao što su: broj frejmova u jedinici vremena t (Frames Per Second) izražen u Hz i veličina koraka kvantizacije (q) [145]. U ovoj analizi, odabrali smo broj frejmova u sekundi, kvalitet i podešavanja enkodera, koji su dati u [145] za “Foreman” video sekvencu kodovanja iz softvera za SVC [146].

Slika 5.7 prikazuje propusni opseg i utrošak energije po jedinici servisa (video kanala) u zavisnosti od video kvaliteta merenog u MOS (SFN-eMBMS servis). Kvalitetnija video isporuka ostvaruje se povećanjem potrošnje energije i propusnog opsega po video kanalu. Samim tim, UE-a će biti u ponudi kanali sa većim protokom. Na primer, za kvalitet video servisa MOS=4.5

zahteva se postojanje kanala velikog protoka $R \geq 800\text{kbit/s}$, propusni opseg od 0.9 [MHz/kanalu] i potrošnju energije od 8 [mJ/kanalu]. UE-i koji imaju na raspolaganju video servis MOS=4.2 moći će primiti podatke sa protokom $R \geq 400\text{kbit/s}$, smanjujući propusni opseg i potrošnju energije za skoro 45% po kanalu.

5.2 Dizajn i analiza eMBMS servisa u LTE/LTE-A mrežama primenom stohastičke geometrije

Poznato je da je matematička analiza standardnog heksagonalnog (grid) modela MCN-e, koja se u poslednje tri decenije intenzivno koristi kako u industriji tako u akademskim krugovima, veoma složena. Izraz za SINR, koji je rezultat takvog modela, je složen i dobija se na osnovu metrike koja se obično procenjuje dugotrajnim simulacijama (Monte Karlo metodom) ili pojednostavljenim i potencijalno netačnim Wyner modelom [81]. Savremene MCN-e postaju još složenije zbog raspodele više različitih klasa eNB-a (makro, mikro i piko) koje nemaju iste karakteristike. Međutim, za neke jednostavne i dovoljno tačne modele prostorne raspodele (kao što je PPP), kao rezultat dobija se jednostavan analitički izraz za SINR (jednačina 3.29). Izraz pokrivenosti SINR je dobijen upotrebom stohastičke geometrije sa iznenađujuće prostim jednačinama tzv. otvorenoj formi (open form) [50], [147].

5.2.1 Model sistema

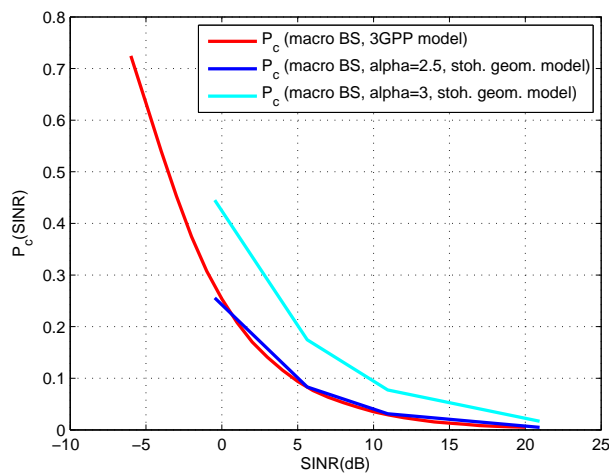
Posmatramo multicast uslužni eMBMS servis u LTE/LTE-A HetNets koje su modelovane kao višeklasni ćelijski sistem, gde klase reprezentuju skupove eNB-a istog hijerarhijskog nivoa (u našem primeru, makro i piko). Pretpostavili smo slučajnu raspodelu makro i piko eNB-e koje su raspodeljene Poissonovim procesom Φ_m, Φ_p sa gustinama λ_m, λ_p i predajnim snagama P_m, P_p . Svakoj klasi eNB-a (makro i piko) dodeljen je odvojen i nepreklapajući opseg PHY RB-a (isti pristup može da se koristi ako male ćelije imaju isti skup PHY RB-a kao i makro ćelijska mreža). Takođe, pretpostavili smo da je UE povezan na najjaču eNB-u, bez obzira kojoj klasi pripada. Nas interesuje verovatnoća pokrivenosti $P_c = P(\text{SINR}(x) \geq \beta)$, gde je β dati prag SINR i $\text{SINR}(x)$ je SINR UE-a za kojeg pretpostavljamo da je uniformno i slučajno raspodeljen

u oblasti koja se posmatra. Implementirali smo 2-klasni model i realizovali statistiku SINR pokrivenosti na dva načina:

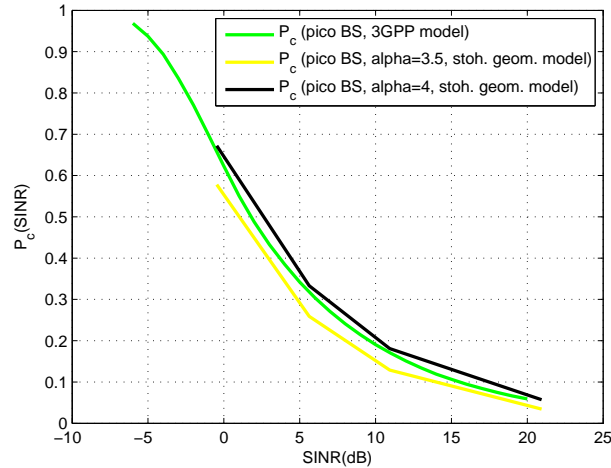
1. upotrebom jednačina koje proizilaze iz stohastičke geometrije
2. upotrebom realnog 3GPP modela u simulacionom procesu

Mi primenjujemo jednačine stohastičke geometrije zbog njihove jednostavnosti. Takođe, primenjujemo i simulirane 3GPP modele kako bi se izvršila precizna parametrizacija jednačina stohastičke geometrije.

Slike 5.8 i 5.9 prikazuju poređenje verovatnoće pokrivenost P_c dobijenih pomoću 3GPP simulacionog modela (sekcija 5.1.1) i modela stohastičke geometrije za 1-klasnu raspodelu MCN-e (samo makro ili samo piko eNB) datog jednačinom (3.31) u sekciji 3.3.2. Kako bismo odredili tačnu vrednost path loss parametra α , koji najbolje odgovara stvarnom 3GPP modelu, koristili smo metod najmanjeg kvadrata greške (least square error). Na slikama se vidi da vrednosti parametara $\alpha = 2.5$ i $\alpha = 4$ predstavljaju najbolje poklapanje sa stvarnim 3GPP modelom za raspodelu 1-klasnih eNB (makro i piko) [60].



Slika 5.8: Poređenje P_c 3GPP modela i modela stohastičke geometrije za 1-klasne mreže (samo makro eNB-e).

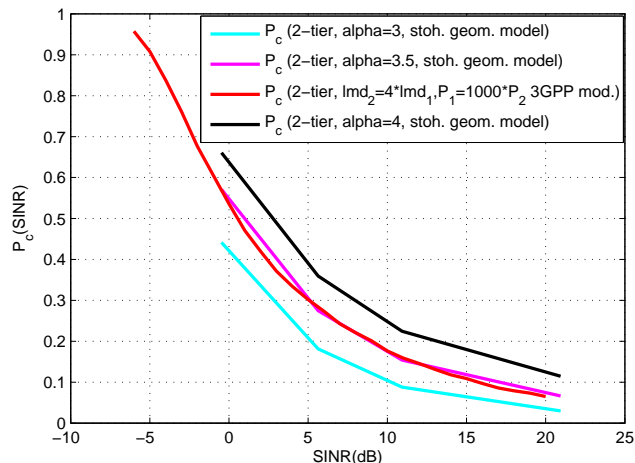


Slika 5.9: Poređenje P_c 3GPP modela i modela stohastičke geometrije za 1-klasne mreže (samo piko eNB-e).

Slika 5.10 predstavlja poređenje verovatnoće pokrivenosti P_c dobijene uz pomoć 3GPP simulacionog modela (sekcija 5.1.2) i modela stohastičke geometrije za 2-klasnu raspodelu mreže (makro+piko eNB-e) koja se dobija formulom (3.30) u sekciji 3.3.2, na isti način kao što je realizovano za 1-klasnu mrežu. Slika prikazuje da vrednost parametra $\alpha = 3.5$ predstavlja najbolje poklapanje sa stvarnim 3GPP modelom za raspodelu 2-klasnih eNB-a (makro+piko) [60].

5.2.2 eMBMS video multicast bazirani servis za LTE-A Het-Nets

Nakon izvršene kalibracije izraza stohastičke geometrije u simuliranom 3GPP modelu, biće predstavljene postignute vrednosti protoka podataka za eMBMS video multicast bazirani servis preko LTE-A HetNets. Ova struktura modelovana je kao 2-klasni ćelijski sistem. Mi koristimo rezultate iz (5.2.1), odnosno primenjujemo stohastičku geometriju zasnovanu na analizi verovatnoće pokrivenosti za različite odnose snaga i gustina eNB-a u 2-klasnoj MCN-i. Vrednost postignutog protoka podataka na samom UE-u pretpostavljen je u



Slika 5.10: Poređenje P_c 3GPP modela i modela stohastičke geometrije za 2-klasne mreže (makro+piko eNB-a).

okviru modela čije objašnjenje sledi. PHY sloj koji opslužuje eNB može biti podešen na odgovarajuću CQI vrednost od 0 do 15 AMC sheme (sekcija 5.1.1). Neka eNB isporučuje eMBMS servis koristeći AMC šemu sa CQI vrednošću i . Pretpostavili smo da će svi UE-i čiji SINR na prijemu prelazi prag SINR (i) AMC sheme i (odnosno, svi UE-i su obuhvaćeni AMC sheme i) moći pouzdano primiti ovu servisnu uslugu. Prosečan protok podataka koji je ostvaren na samom UE-u (obuhvaćenom AMC shemeom i) dobija se kao:

$$R_i = \frac{TBS(i) \cdot N_{RBP}}{TTI} (1 - BLER(i)), \quad (5.19)$$

gde je $TBS(i)$ količina informacije PHY TB-a (u bitima) i $BLER(i)$ je prosečan BLER i -te vrednosti AMC sheme (sekcija 5.1.1). Obično je BLER fiksiran, oko 10% gubitaka PHY TB-a AMC sheme [105]. Prosečna vrednost protoka podataka $R_{avg}(i)$, tj. dostavljanje podataka PHY TB-m preko LTE-A HetNets dobija se množenjem protoka podataka UE-a i verovatnoće pokrivenosti za svaku od dostupnih AMC shema:

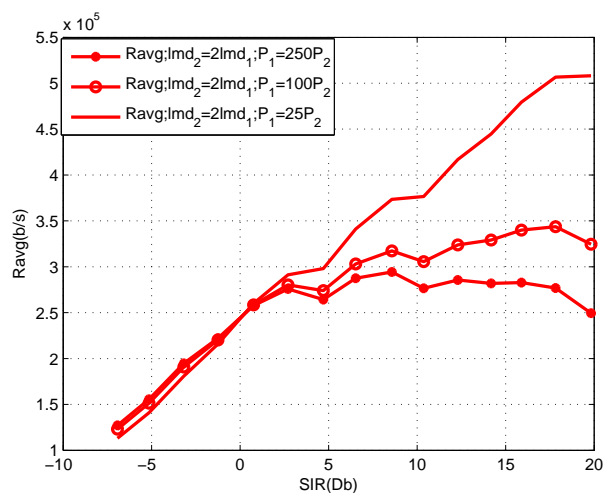
$$R_{avg}(d) = R_i \cdot P_c(i), \quad (5.20)$$

gde je R_i , $P_c(i)$ predstavljaju protok podataka (jednačina 5.19) i verovatnoću pokrivenosti UE-a kada AMC shema odgovara izabranoj CQI vrednosti i .

Osnovni zadatak jeste kako odabrati optimalnu AMC shemu prenosa na PHY sloju. Odnosno kako maksimalno iskoristiti eMBMS uslugu u servisu 2-klasnog sistema upotrebom dostupnih AMC shema. Treba imati na umu ako povećamo AMC shemu, povećava se protok (kao i kvalitet usluge) UE-a koji primaju usluge. Samim tim, mi bismo smanjili oblast pokrivenost koju obuhvata taj servis (tj. manji broj UE-a dobija uslugu tako povećane AMC sheme), tako da evidentno postoji kompromis u projektovanju. Predstavili smo servis za različite konfiguracije sistema i posmatrali prosečan protok koji servis ostvaruje gde su podešavani parametri odnosa snaga i gustina u 2-klasnoj MCN-i za različite AMC sheme. Dobili smo i prikazali prosečne rezultate u pogledu osnovnih parametara sistema: odnos snage ($P_1/P_2 = 25;100;250$), odnos gustine eNB-a ($\lambda_1/\lambda_2 = 2; 4; 8$) i primenjene AMC sheme.

Slika 5.11 prikazuje rezultate dobijene za scenario gde je fiksiran odnos gustina između različitih klasa eNB-a, dok je odnos snaga između klasa promenljiv. Smatramo da $\lambda_1/\lambda_2=2$ odgovara prostornoj raspodeli malih ćelija (samo dve male ćelije po makro ćeliji u proseku). Treba napomenuti da veliki odnos snaga $P_1/P_2 = 250$ odgovara makro/femto odnosu snaga. Povećanjem AMC sheme neće dovesti do povećanja prosečnog protoka u MCN-a, dok veličina pokrivenosti oblasti opada. Sa slike 5.11, jasno je da se dobro rešenje može ostvariti korišćenjem AMC sheme koja aproksimativno odgovara stanju CQI 6 na SIR = 3dB. U tom slučaju imamo da daljim povećanjem indeksa AMC sheme, prosečan protok UE-a povećava se samo marginalno, dok veličina pokrivenosti oblasti drastično opada. Manja vrednost odnosa snaga $P_1/P_2=25$ odgovara makro/mikro odnosu snaga, prosečan protok raste skoro linearno sa povećanjem AMC sheme. Ovo je zbog činjenice da, sa porastom primenjene AMC sheme, protok podataka UE-a se povećava znatno brže dok verovatnoća pokrivenosti oblasti P_c opada. To dovodi do vidljive nepravilnosti u kojoj se prosečan protok u ćeliji dobija u konfiguraciji gde je veoma visok protok ponuđen UE-a u veoma maloj oblasti pokrivenosti. Iz toga sledi da metrika koja u jednačini (5.20) definiše prosečan protok podataka nije najbolji kriterijum, jer uzima u obzir prosečan protok, ali ne i opšte stanje MCN-e.

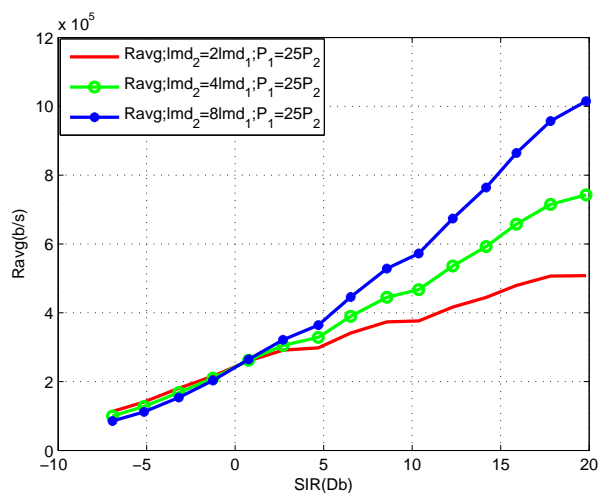
Slika 5.12 ilustruje rezultate dobijene za scenario gde je fiksiran koeficijent



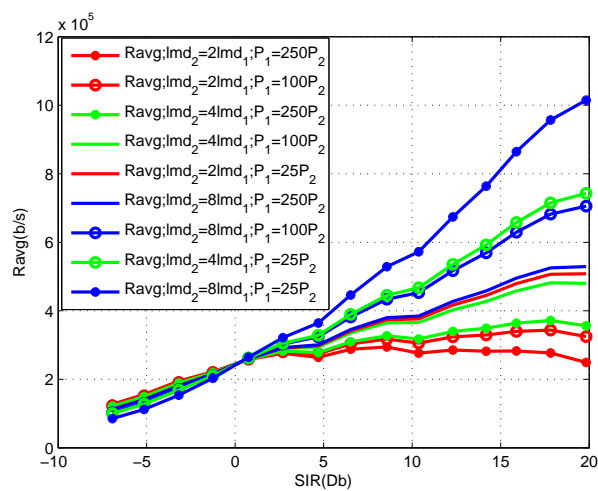
Slika 5.11: Prosećan protok podataka za odnos snaga ($P_1/P_2 = 25;100;250$) i odnos gustina ($\lambda_1/\lambda_2=2$).

snaga P_1/P_2 , a odnos gustina eNB-a na različitim slojevima se menja. Konkretno, mi primenjujemo odnos $P_1/P_2=25$ koji odgovara makro/mikro scenariju. Povećanje odnosa gustina λ_1/λ_2 , pokazuje linearno povećanje prosečnog protoka. Takođe, verovatnoća pokrivenosti se poboljšava sa povećanim λ_1/λ_2 . Međutim povećanjem AMC sheme generalno se smanjuje oblast pokrivenog područja. Ovo smanjenje može se smatrati uravnotežavanjem predhodnih parametra koji se povećavaju porastom odnosa λ_1/λ_2 .

Slika 5.13 pokazuje prosećan protok za različite odnose snaga i gustina koji generalno favorizuje povećanje AMC sheme.



Slika 5.12: Prosečan protok podataka za odnos snaga ($P_1/P_2=25$) i odnos gustina ($\lambda_1/\lambda_2=2;4;8$).



Slika 5.13: Prosečan protok podataka za odnos snaga ($P_1/P_2=25;100;250$) i odnos gustina ($\lambda_1/\lambda_2=2;4;8$).

Analiza energetske efikasnosti isporuke multimedijalnih servisa u mobilnim ćelijskim sistemima predstavlja aktivno polje istraživanja. Iako se godinama radi na ovoj temi, istraživanja u oblasti analize energetske efikasnosti i dalje privlače značajnu pažnju usled stalne evolucije MCN-a. U ovoj disertaciji predstavljena je energetska efikasnost isporuke multimedijalnih servisa u mobilnim ćelijskim sistemima četvrte generacije (LTE/LTE-A). Analiza je vršena u dva pravca. Prvi pravac predstavljao je primenu standardnih 3GPP modela. Ovi modeli definisali su path loss gubitke za makro, mikro i piko eNB koje čine elemente pokrivanja oblasti (gradovi, naselja....). U okviru ovog pravca, dat je jednostavan analitički pristup za prosečan protok servisne usluge, koja je ograničena zahtevima verovatnoće pokrivenosti. Na osnovu ovog pristupa izvedeni su propusni opseg i utrošak energije po jedinici servisa (tipično, video kanala konstantnog digitalnog protoka). Dobijeni rezultati omogućuju univerzalan način da se evaluira propusni opseg i energetska efikasnost projektovanja multimedijalnih usluga u sadašnjim i budućim konfiguracijama LTE/LTE-sistema. Kao demonstracija, predloženi model se primenjuje na SFN-eMBMS, SC-eMBMS konfiguracije i različite Het-Nets topologije. Drugi pravac predstavlja primenu jednačina stohastičke geometrije za modelovanje 2-klasne Het-Nets, gde su takođe analizirani prosečno ostvarljivi protoci. U razmatranje su uzete novo-predložene 3GPP strategije za raspodelu video multicasting i broadcasting servisa preko LTE/LTE-A HetNets. Realizovan je jednostavan analitički pristup za prosečan protok servisa na osnovu upotrebe stohastičke geometrije. Razmotreni su rezultati prosečnog protoka uz ograničenje koje zahteva verovatnoća pokrivenosti. Odnos snaga (P_1/P_2) i odnos gustina (λ_1/λ_2) dve klase eNB-a u 2-klasnom Het-Nets scenariju čine osnovne parametre na osnovu kojih su vršena poređenja prosečnih rezultata protoka servisa. SC-eMBMS konfiguracija se primenjuje u 2-klasnoj HetNets, kao demonstracija

energetski efikasnih topologija. U nastavku istraživanja, mi ćemo uvesti dodatne metrike koje će imati za cilj uspostavljanje bolje ravnoteže između prosečnog protoka i oblasti pokrivenog područja u okviru multi-tier scenarija.

Literatura

- [1] Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang, and C. G. Kang, *MIMO OFDM Wireless Communications With Matlab*. John Wiley and Sons, 2010.
- [2] Rohde and S. Products, “dostupno na:” http://www.rohde-schwarz.com/en/applications/umts-long-term-evolution/-lte-technology-introduction-application-note_56280-15658.html, 2012. (pregledano: 05.03.2015.).
- [3] A. Note, “Lte phy layer measurement guide dostupno na:” www.juds.com/test, 2011. (pregledano: 05.03.2015.).
- [4] M. I. Salman, M. Q. Abdulhasan, C. K. Ng, N. Noordin, K. A. Sali, and B. A. Mohd, “Radio resource management for green 3gpp long term evolution cellular networks: Review and trade-offs,” *IETE Technical Review*, pp. 257–269, 2013.
- [5] K. K. W. Paper, “dostupno na:” http://www.tcs.com/rss_feeds/Pages/feed.aspx?f=w, 2013. (pregledano: 20.09.2015.).
- [6] S. J. Yi, S. D. Chun, Y. D. Lee, S. J. Park, and S. H. Jungr, *Radio Protocols for LTE and LTE-Advanced*. John Wiley and Sons, 2012.
- [7] Y. Chen, S. Zhang, S. Xu, and G. Y. Li, “Fundamental trade offs on green wireless networks,” *IEEE Communications Magazine*, pp. 30–37, 2011.

-
- [8] T. S. Rappaport, *Wireless Communications - Principles and Practice*. Prentice Hall, 2001.
- [9] I. Cotanis and A. Hedlund, *Fundamentals of wireless communication*. Cambridge University Press, 2013.
- [10] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [11] J. Arauz, P. Krishnamurthy, and M. A. Labrador, “Discrete rayleigh fading channel modeling,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, pp. 413–425, 2002.
- [12] C. Cox, *Performance of LTE and LTE-Advanced*. John Wiley and Sons, 2012.
- [13] Motorola, *Long Term Evolution (LTE): overview of LTE Air Interface*. PhD thesis, Technical White Paper, 2008.
- [14] G. C. Logrono, “dostupno na:” <https://community.sprint.com/baw/.../LTE-Advanced-Release-10.pdf>, 2010. (pregledano: 20.09.2015.).
- [15] K. Fazel and S. Kaiser, *Multi Carrier and Spread Spectrum Systems From OFDM and MC CDMA to LTE and WiMAX*. John Wiley and Sons, 2008.
- [16] Cisco, “Cisco visual networking.” <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/service-provider/visual-networking-index-vni/index.html>, 2016. (pregledano: 05.02.2016.).
- [17] G. L. Stüber, *Principles of mobile communication*. Kluwer Academic, 2002.
- [18] H. Zarrinkoub, *Understanding LTE with MATLAB : from mathematical foundation to simulation, performance evaluation and implementation*. John Wiley and Sons, 2014.
- [19] 3GPP25.912, *Feasibility Study for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)*. Technical Specification, 2007.

-
- [20] 3rd Generation Partnership Project, “dostupno na:” <http://www.3gpp.org>, 2011. (pregledano: 24.03.2014.).
- [21] J. Wu, S. Rangan, and H. Zhang, *Green Communications: Theoretical Fundamentals Algorithms and Applications*. CRC Press, 2012.
- [22] E. Oh, B. Krishnamachari, X. Liu, and Z. Niu, “Towards dynamic energy-efficient operation of cellular network infrastructure,” *IEEE Communications Magazine*, pp. 56–61, 2011.
- [23] G. Fettweis and E. Zimmermann, “Ict energy consumption-trends and challenges,” in *Proceedings IEEE WPMC*, (Lapland), 2008.
- [24] ABIResearch, *Mobile network energy OPEX to rise dramatically to \$ 22 billion in 2013*. ABIResearch, 2013.
- [25] K. Fujimoto, *Mobile antenna systems handbook*. Artech House, 2008.
- [26] C. C. T. Networks, “dostupno na:” <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr04/sector.htm>, 2008. (pregledano: 02.03.2015.).
- [27] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of wireless communication*. Cambridge University Press, 2005.
- [28] V. H. MacDonald, “Advanced mobile phone service: The cellular concept,” *Bell System Technical Journal*, pp. 15–41, 1979.
- [29] K. Johansson, *Cost effective deployment strategies for heterogeneous wireless net-works*. PhD thesis, KTH Information and Communication Technology, Stockholm, Sweden, 2007.
- [30] S. Landstrom, A. Furuskar, K. Johansson, L. Falconetti, and F. Kronestedt, “Heterogeneous networks—increasing cellular capacity,” *The data boom: opportunities and challenges*, p. 4, 2011.
- [31] A. Khandekar, N. Bhushan, T. Ji, and V. Vanghi, “Lte-advanced: Heterogeneous networks,” in *Proceedings of the European Wireless Conferences*, (Lucca, Italy), pp. 978–982, 2010.

-
- [32] D. Jiang, X. Wang, Y. Zhang, Y. Zheng, X. Shen, and G. Liu, "Frequency shifted frequency reuse for lte heterogeneous networks," in *Proceedings of the 7th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing*, (Wuhan), pp. 1–5, 2011.
- [33] 3GPP36.300, *Version 9.4.0 Release 9, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)*. Technical Specification, 2007.
- [34] 3GPP36.213, *Version 9.2.0 Release 9, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Physical layer procedures*. Technical Specification, 2010.
- [35] M. Haenggi, J. G. Andrews, F. Baccelli, O. Dousse, and M. Franceschetti, "Stochastic geometry and random graphs for the analysis and design of wireless networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, pp. 1029–1046, 2009.
- [36] C. H. Lee and M. Haenggi, "Interference and outage in poisson cognitive networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions*, pp. 1392–1401, 2012.
- [37] A. Baddeley, "Spatial point processes and their applications," *Book Chapter Lecture Notes in Mathematics: Stochastic Geometry*, pp. 1–75, 2007.
- [38] H. ElSawyi, E. Hossain, and M. Haenggi, "Stochastic geometry for modeling, analysis, and design of multi-tier and cognitive cellular wireless networks: A survey," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, pp. 996–1019, 2013.
- [39] M. Haenggi and R. Ganti, *Interference in large wireless networks*. Now Publishers, 2008.
- [40] D. Stoyan, W. S. Kendall, and J. Mecke, *Stochastic Geometry and its Applications*. John Wiley and Sons, 1995.
- [41] M. Haenggi, *Stochastic Geometry for Wireless Networks*. Cambridge University Press, 2012.

-
- [42] S. Weber and J. G. Andrews, *Stochastic Geometry for Wireless Networks*. Now Publishers, 2012.
- [43] A. Okabe, B. Boots, K. Sugihara, and S. N. Chiu, *Stochastic Geometry and its Applications*. John Wiley and Sons, 2000.
- [44] D. C. Barr, *Applications of Voronoi tessellations in point pattern analysis*. PhD thesis, University of California Los Angeles, 2008.
- [45] M. de Berg, M. van Kreveld, and M. Overmars, *Computational Geometry: Algorithms and Applications*. Springer-Verlag, 2000.
- [46] J. S. Ferenc and Z. Neda, "On the size distribution of poisson voronoi cells," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, pp. 518–526, 2007.
- [47] H. S. Dhillon, *Fundamentals of Heterogeneous Cellular Networks*. PhD thesis, the University of Texas at Austin, 2013.
- [48] M. Haenggi, *Stochastic Geometry for Wireless Networks*. Cambridge University Press, 2013.
- [49] J. G. Andrews, F. Baccelli, and R. K. Ganti, "A tractable approach to coverage and rate in cellular networks," *IEEE Transactions on Communications*, pp. 3122–3134, 2007.
- [50] H. S. Dhillon, F. Baccelli, R. K. Ganti, and J. G. Andrews, "A tractable approach to coverage and rate in cellular networks," *IEEE Transactions on Communications*, pp. 3122–3134, 2007.
- [51] D. Cao, S. Zhou, and Z. Niu, "Frequency shifted frequency reuse for lte heterogeneous networks," in *In Communications (ICC), IEEE International Conference*, (Ottawa), pp. 4379–4383, 2012.
- [52] M. Simon and M. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels: A Unified Approach to Performance Analysis*. John Wiley and Sons, 2000.
- [53] B. Sklar, *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. Prentice Hall, 2002.

-
- [54] M. Patzold, *Mobile Fading Channels*. John Wiley and Sons, 2002.
- [55] S. Tabbane, *Handbook of Mobile Radio Networks*. Artech House Boston, 2000.
- [56] H. T. Friis, "A note on a simple transmission formula," *Proceedings of the IRE*, pp. 254–256, 1946.
- [57] M. Hata, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services," *IEEE Transactions Vehicular Technology*, pp. 317–325, 1980.
- [58] COSTAction231, *Digital mobile radio towards future generation systems, final report*. European Communities Technical Report, 1999.
- [59] S. Saunders, *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*. John Wiley and Sons, 2000.
- [60] 3GPP36.814, *Version 9.0.0 Release 9, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Further advancements for E-UTRA physical layer aspects*. Technical Specification, 2010.
- [61] 3GPP36.931, *Version 9.0.0 Release 9 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Radio Frequency (RF) requirements for LTE Pico Node B*. Technical Specification, 2009.
- [62] H. J. Li, C. C. Chen, T. Y. Liu, and H. C. Lin, "Applicability of ray tracing techniques for prediction of outdoor channel characteristics," *IEEE Transactions Vehicular Technology*, pp. 2336–2349, 2000.
- [63] C. E. Shannon, "Certain results in coding theory for noisy channels," *Information and Control*, pp. 6–25, 1957.
- [64] D. Blackwell, L. Brieman, and A. J. Thomasian, "Proof of shannons theorem for finite state indecomposable channels," *The Annals of Mathematical Statistics*, pp. 1209–1220, 1958.
- [65] E. N. Gilbert, "Capacity of a burst-noise channel," *Bell System Technical Journal*, pp. 1253–1265, 1960.

-
- [66] E. O. Elliott, "Estimates of error rates for codes on burst-noise channels," *Bell System Technical Journal*, pp. 1977–1997, 1963.
- [67] R. H. McCullough, "The binary regenerative channel," *Bell System Technical Journal*, pp. 1713–1735, 1968.
- [68] B. D. Fritchman, "A binary channel characterization using partitioned markov chains," *IEEE Transactions on Information Theory*, pp. 221–227, 1967.
- [69] R. G. Gallager, *Information Theory and Reliable Communication*. John Wiley and Sons, 1968.
- [70] R. Liao, W. Tu, P. Excell, and V. Grout, "Qos analysis models for wireless networks," in *E Learning, Internet and Networking (SEIN 2009)*, (Germany), 2009.
- [71] H. S. Wang and N. Moayeri, "Modeling capacity and joint source/channel coding or rayleigh fading channels," *IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 473–479, 1993.
- [72] H. S. Wang and N. Moayeri, "Finite state markov channel a useful model for radio communications channels," *IEEE Transactions Vehicular Technology*, pp. 163–171, 1995.
- [73] M. Zorzi, R. R. Rao, and L. B. Milstein, "Error statistics in data transmission over fading channels," *IEEE Transactions on Communications*, pp. 1468–1476, 1998.
- [74] Q. Zhang and S. A. Kassam, "Finite state markov model for rayleigh fading channels," *IEEE Transactions on Communications*, pp. 1688–1692, 1999.
- [75] C. C. Tan and N. C. Beaulieu, "On first-order markov modeling for the rayleigh fading channel," *IEEE Transactions on Communications*, pp. 2032–2040, 2000.
- [76] P. Sadeghi, R. A. Kennedy, P. B. Rapajic, and R. Shams, "Finite-state markov modeling of fading channels - a survey of principles and applications," *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 57–80, 2008.

-
- [77] R. Prasad, *OFDM for wireless communications systems*. Artech House Boston, 2004.
- [78] C. Iskander and P. T. Mathiopoulos, "Fast simulation of diversity nakagami fading channels using finite-state markov models," *IEEE Transactions Broadcasting*, pp. 269–277, 2003.
- [79] P. Lin, J. Zhang, Y. Chen, and Q. Zhang, "Macro-femto heterogeneous network deployment and management: From business models to technical solutions," *IEEE Wireless Communications*, pp. 64–70, 2011.
- [80] K. Samdanis, T. Taleb, and S. Schmid, "Traffic offload enhancements for eutran," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, pp. 884–896, 2011.
- [81] J. Xu, J. Zhang, and J. G. Andrews, "On the accuracy of the wyner model in cellular networks," *IEEE Transactions Wireless Communications*, pp. 3098–3109, 2011.
- [82] A. D. Wyner, "A binary channel characterization using partitioned markov chains," *IEEE Transactions on Information Theory*, pp. 1713–1727, 1994.
- [83] K. Gilhousen, I. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L. Weaver, and C. Wheatley, "A binary channel characterization using partitioned markov chains," *IEEE Transactions on Information Theory*, pp. 1713–1727, 1994.
- [84] E. N. Gilbert, "On the capacity of a cellular cdma system," *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, pp. 533–543, 1961.
- [85] M. D. Penrose, *Random Geometric Graphs*. Oxford University Press, 2003.
- [86] M. Franceschetti and R. Meester, *Random Geometric Graphs*. Cambridge University Press, 2007.
- [87] S. Musa and W. Wasylkiwskyj, "Co-channel interference of spread spectrum systems in a multiple user environment," *IEEE Transactions on Communications*, pp. 1405–1413, 1978.

-
- [88] E. S. Sousa and J. A. Silvester, "Optimum transmission ranges in a direct-sequence spread spectrum multihop packet radio network," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, pp. 762–771, 1990.
- [89] E. S. Sousa, "Interference modeling in a direct-sequence spread spectrum packet radio network," *IEEE Transactions on Communications*, pp. 1475–1482, 1990.
- [90] J. Ilow and D. Hatzinakos, "Analytical alpha-stable noise modeling in a poisson field of interferers or scatterers," *IEEE Transactions on Signal Processing*, pp. 1601–1611, 1998.
- [91] F. Baccelli, M. Klein, M. Lebourges, and S. Zuyev, "Analytical alpha-stable noise modeling in a poisson field of interferers or scatterers," *Journal Telecommunication Systems*, pp. 209–227, 1997.
- [92] S. R. Broadbent and J. M. Hammersley, "Percolation processes," *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, pp. 629–641, 1957.
- [93] L. Booth, J. B. M. Franceschetti, and R. Meester, "Covering algorithms continuum percolation and the geometry of wireless networks," *Annals of Applied Probability*, pp. 722–741, 2003.
- [94] L. Wei and M. D. Renzo, "Stochastic geometry modeling of cellular networks: Analysis simulation and experimental validation," *arXiv preprint*, p. arXiv:1506.03857, 2015.
- [95] OFCOM, "Sitefinder database." <http://stakeholders.ofcom.org.uk/sitefinder/sitefinder-dataset/>, 2013. (pregledano: 05.03.2015.).
- [96] O. O. Data, "Ordnance survey: Britains mapping agency." <https://www.ordnancesurvey.co.uk/opendatadownload/products.html>., 2015. (pregledano: 20.09.2015.).
- [97] M. D. Renzo, "Stochastic geometry modeling and analysis of multi-tier millimeter wave cellular networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, pp. 5038 – 5057, 2015.

-
- [98] B. Blaszczyszyn, M. K. Karray, and H. P. Keeler, "Using poisson processes to model lattice cellular networks," in *IEEE INFOCOM 2013*, (Turin), pp. 773–781, 2015.
- [99] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, and P. Beming, *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Academic Press, 2011.
- [100] H. Holma and A. Toskala, *LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. John Wiley and Sons, 2009.
- [101] 3GPPT31.102, *Characteristics of the Universal Subscriber Identity Module (USIM) Application*. Technical Specification, 2011.
- [102] 3GPPTS23.401, *General Packet Radio Service (GPRS) Enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Access*. Technical Specification, 2011.
- [103] 3GPPTS23.002, *Network Architecture*. Technical Specification, 2011.
- [104] H. G. Myung and D. J. Goodman, *Single Carrier FDMA, New Air Interface for LTE*. John Wiley and Sons, 2008.
- [105] A. Larmo, M. Lindstrom, M. Meyer, G. Pelletier, J. Torsner, and H. Wiemann, "The lte link-layer design," *IEEE Transactions on Communications*, pp. 52–59, 2009.
- [106] 3GPPTS23.246, *Release 10 Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS) Architecture and Functional Description*. Technical Specification, 2011.
- [107] 3GPPTS26.346, *Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS) Protocols and codecs (Release 10)*. Technical Specification, 2012.
- [108] M. Gruber and D. Zeler, "Multimedia broadcast multicast service: New transmission scheme and related challenges," *IEEE Communications Magazine*, pp. 176–181, 2011.
- [109] OFCOM, *Project Real Wireless 4G Capacity Gains*. final report, 2011.

-
- [110] C. Han, T. Harrold, S. A. I. Krikidis, and S. V. et al., "Green radio: Radio techniques to enable energy-efficient wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, pp. 46–54, 2011.
- [111] J. Manner, M. Luoma, J. Ott, and J. Hamalainen, "Mobile networks unplugged," in *1st International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking*, (Passau), pp. 1–4, 2010.
- [112] J. He, P. Loskot, T. O'Farrell, V. Friderikos, S. Armour, and J. Thompson, "Energy efficient architectures and techniques for green radio access networks," in *5th International ICST Conference on Communications and Networking*, (Beijing), pp. 1–6, 2010.
- [113] C. Liu, Z. Pan, N. Liu, and X. You, "A novel energy saving strategy for lte hetnet," in *IEEE WCSP 2011*, (Nanjing), pp. 1–4, 2011.
- [114] A. J. Fehske and F. R. G. P. Fettweis, "Energy efficiency improvements through micro sites in cellular mobile radio networks," in *IEEE GLOBECOM Workshops*, (Honolulu), pp. 1–5, 2009.
- [115] W. Wang and G. Shen, "Energy efficiency of heterogeneous cellular network," in *IEEE VTC 2010*, (Ottawa), pp. 1–5, 2010.
- [116] G. Auer, I. Godor, L. Hevizi, M. A. Imran, and J. M. et al., "Enablers for energy efficient wireless networks," in *IEEE VTC 2010*, (Ottawa), pp. 1–5, 2010.
- [117] Y. Chen, S. Zhang, and S. Xu, "Characterizing energy efficiency and deployment efficiency relations for green architecture design," in *IEEE ICC 2010*, (Cape Town), pp. 1–5, 2010.
- [118] M. S. Alouini and A. J. Goldsmith, "Area spectral efficiency of cellular mobile radio systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 1047–1066, 1999.
- [119] F. Richter, A. J. Fehske, and G. P. Fettweis, "Energy efficiency aspects of base station deployment strategies for cellular networks," in *IEEE VTC 2009*, (Anchorage), pp. 1–5, 2009.

-
- [120] O. Arnold, F. Richter, and A. J. Fehske, "Power consumption modeling of different base station types in heterogeneous cellular networks," in *Future Network and Mobile Summit*, (Florence), pp. 1–8, 2010.
- [121] C. Shannon, "A mathematical theory of communication," *Bell Systems Technical Journal*, pp. 623–656, 1948.
- [122] C. Tao, Y. Yang, H. Zhang, H. Kim, and K. Horneman, "Network energy saving technologies for green wireless access networks," *IEEE Wireless Communications*, pp. 30–38, 2011.
- [123] S. Tombaz, P. Monti, K. Wang, V. Anders, M. Forzati, and J. Zander, "Impact of backhauling power consumption on the deployment of heterogeneous mobile networks," in *IEEE GLOBECOM 2011*, (Houston), pp. 1–5, 2011.
- [124] D. Ferling, T. Bohn, D. Zeller, P. Frenger, I. Godor, Y. Jading, and W. Tomaselli, "Energy efficiency approaches for radio nodes," in *Future Network and Mobile Summit*, (Florence), pp. 1–9, 2010.
- [125] F. Richter and G. Fettweis, "Cellular mobile network densification utilizing micro base stations," in *IEEE ICC 2010*, (Cape Town), pp. 1–6, 2010.
- [126] F. Richter, A. Fehske, J. P. Marsch, and G. Fettweis, "Traffic demand and energy efficiency in heterogeneous cellular mobile radio networks," in *IEEE VTC 2010*, (Taipei), pp. 1–6, 2010.
- [127] H. Klessig, A. Fehske, and G. Fettweis, "Energy efficiency gains in interference-limited heterogeneous cellular mobile radio networks with random micro site deployment," in *IEEE Sarnoff Symposium 2011*, (Princeton), pp. 1–6, 2011.
- [128] F. I. D. Piazza, S. Mangione, and I. Tinnirello, "Maximizing network capacity in an heterogeneous macro-micro cellular scenario," in *IEEE ISCC 2011*, (Kerkyra), pp. 365–370, 2011.

-
- [129] S. Tombaz, A. Vastberg, and J. Zander, "Energy and cost-efficient ultra-high capacity wireless access," *IEEE Wireless Communications*, pp. 18–24, 2011.
- [130] A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei, T. Ji, and T. L. et al., "A survey on 3gpp heterogeneous networks," *IEEE Wireless Communications*, pp. 10–21, 2011.
- [131] H. Claussen, L. T. W. Ho, and F. Pivit, "Effects of joint macrocell and residential picocell deployment on the network energy efficiency," in *IEEE PIMRC 2011*, (Kerkyra), pp. 1–6, 2008.
- [132] K. Zheng, Y. Wang, W. W. M. Dohler, and J. Wang, "Energy-efficient wireless in-home: The need for interference-controlled femtocells," *IEEE Wireless Communications*, pp. 36–44, 2011.
- [133] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, T. Muharemovic, Z. Shen, and A. Gatherer, "Power control in two-tier femtocell networks," *IEEE Wireless Communications*, pp. 4316–4328, 2009.
- [134] 3GPPTR36.913, *Version 8.0.1 Release 8 Requirements for further advancements for E-UTRA*. Technical Specification, 2009.
- [135] C. Khirallah, D. Vukobratovic, and J. Thompson, "Bandwidth and energy efficiency of video broadcasting services over lte/lte-a," in *IEEE WCNC 2013*, (Shanghai), pp. 1909–1914, 2013.
- [136] Simulator, "Lte simulator." <http://www.nt.tuwien.ac.at/ltesimulator>, 2011. (pregledano: 05.03.2015.).
- [137] M. Gruber and D. Zeler, "Multimedia broadcast multicast service: New transmission scheme and related challenges," *IEEE Wireless Communications*, pp. 176–181, 2009.
- [138] O. Oyman, J. Foerster, Y. J. Tcha, and S. C. Lee, "Towards enhanced mobile video services over wimax and lte," *IEEE Wireless Communications*, pp. 68–76, 2010.

-
- [139] E. Project, “The eu fp7 ict earth project.” <http://www.ict-earth.eu/>, 2011. (pregledano: 20.09.2015.).
- [140] C. Khirallah, J. S. Thompson, and H. Rashvand, “Energy and cost impact of relay and femtocell deployments in lte-advanced,” *IET Communications*, pp. 2617–2628, 2011.
- [141] C. Khirallah and J. S. Thompson, “Energy efficiency of heterogeneous networks in lte-advanced,” *Journal of Signal Processing Systems*, pp. 105–113, 2011.
- [142] G. 071433, *Efficiency Comparison of MBMS Transmission Modes*. Technical Specification, 2007.
- [143] G. 071049, *Spectral Efficiency Comparison of Possible MBMS Transmission Schemes: Additional Results*. Technical Specification, 2007.
- [144] G. 071433, *Additional Results on eMBMS Transmission*. Technical Specification, 2007.
- [145] Z. Ma, M. Xu, Y. F. Ou, and Y. Wang, “Modeling of rate and perceptual quality of compressed video as functions of frame rate and quantization stepsize and its applications,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, pp. 1051–1215, 2012.
- [146] JSVM, *JSVM Software document JVT X203*. Technical Specification, 2007.
- [147] H. S. Jo, Y. J. Sang, P. Xia, and J. G. Andrews, “Heterogeneous cellular networks with flexible cell association: A comprehensive downlink sinr analysis,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, pp. 3484–3495, 2012.