



**UTICAJ IMPLEMENTACIJE FEMTOĆELIJA NA
ENERGETSKU EFIKASNOST I PERFORMANSE
CELULARNIH TELEKOMUNIKACIONIH MREŽA**

-MAGISTARSKI RAD-

Mentor:

Prof. dr Milica Pejanović-Djurišić

Kandidat:

Aligrudić Ana 9/11

Podgorica, 2015.godine

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANTU

Ime i prezime: Ana Aligrudić

Datum i mjesto rođenja: 18.04.1988, Podgorica, Crna Gora

Završene osnovne studije: Elektrotehnički fakultet u Podgorici, 2011.

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Naziv postdiplomskih studija: Postdiplomske magistarske akademske studije iz oblasti telekomunikacija

Naslov rada: Uticaj implementacije femtoćelija na energetske efikasnost i performanse celularnih telekomunikacionih mreža

Fakultet: Elektrotehnički fakultet u Podgorici

UDK, OCJENA I OBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave magistarskog rada: 07.02.2014.

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 13.03.2014.

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranta: Prof. dr Milica Pejanović-Djurišić
Prof. dr Zoran Veljović
Prof. dr Igor Djurović

Mentor: Prof. dr Milica Pejanović-Djurišić

Komisija za ocjenu rada: Prof. dr Milica Pejanović-Djurišić
Prof. dr Zoran Veljović
Prof. dr Igor Djurović

Komisija za odbranu rada: Prof. dr Milica Pejanović-Djurišić
Prof. dr Zoran Veljović
Prof. dr Igor Djurović

Datum odbrane: 08.04.2015.

Datum promocije:

Izvod rada

Rad opisuje načine za poboljšanje energetske efikasnosti i protoka u mobilnim telekomunikacionim mrežama. S tom namjerom, analizira se rješenje zasnovano na heterogenoj *two-tier* mrežnoj arhitekturi koju čine makro i femto bazne stanice. Istraživanje se bavi modifikacijom tradicionalne makro arhitekture dodavanjem femto baznih stanica u cilju postizanja bolje energetske efikasnosti, zadovoljavanja zahtjeva za većim brzinama prenosa i očuvanja životne sredine. Rad sadrži pregled ključnih performansi celularnih mreža sa numeričkim rezultatima koji se odnose na različite mrežne arhitekture. Dobijeni numerički rezultati se potom verifikuju korišćenjem odgovarajućeg simulacionog alata. Pored toga, u radu je dat detaljan pregled metrika energetske efikasnosti kako bi se precizno utvrdio postignuti nivo energetske efikasnosti i omogućili uporedni grafički prikazi vrijednosti energetske efikasnosti u tradicionalnom i *two-tier* mrežnom scenariju. Jasno je pokazano da razmatrana modifikovana makro-femto arhitektura omogućava značajne energetske uštede uz velika poboljšanja protoka u mobilnim telekomunikacionim mrežama.

Ključne riječi: *femtoćelije, energetska efikasnost, protok, zelena mreža, metrike energetske efikasnosti*

Abstract

This paper describes ways how to enhance energy efficiency and throughput in mobile telecommunication networks. Thus, a solution based on heterogeneous two-tier architecture consisting of macrocells and femtocells is analyzed. The work investigates how to modify traditional mobile cellular network by adding femtocells in order to achieve better energy efficiency, satisfy demands for higher throughput and treat the environment in a greener manner. The paper contains overview of basic cellular network performance parameters which are analytically calculated for different network architectures. Verifications and comparisons with the results obtained using an appropriate simulation tool are also presented. Also, a detailed overview of the energy efficiency metrics is introduced in order to determine the achieved level of energy efficiency and present corresponding graphical comparisons between traditional and two-tier network scenarios. It is clearly shown that the considered two-tier architecture enables significant energy efficiency and throughput improvements in cellular mobile networks.

Keywords: *femtocells, energy efficiency, throughput, green network, energy efficiency metrics*

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Koncept i arhitektura „zelenih“ mreža	3
2.1. Analize i procjene o porastu paketskog saobraćaja	4
2.2. Raspodjela energetske potrošnje u telekomunikacionoj mreži	8
2.3. Konvencionalne celularne telekomunikacione mreže	10
2.4. <i>Two-tier</i> celularne telekomunikacione mreže	11
3. Performanse <i>two-tier</i> mreža	14
3.1. Režimi rada bazne stanice kao funkcija opterećenja u mreži	15
3.2. Gubici u prenosu signala	18
3.3. SINR	21
3.4. Kapacitet i protok	24
4. Numerički i simulacioni rezultati	26
4.1. Numerički proračuni	26
4.2. Simulacioni proračuni	30
5. Metrike energetske efikasnosti	39
5.1. Klasifikacija metrika energetske efikasnosti	39
5.2. TEEER (Telecommunications Equipment Energy Efficiency Ratio)	43
5.3. PI urban (Performance indicator for urban areas)	45
5.4. KPIEE (Key Performance Indicator Energy Efficiency)	46
6. Zaključak	48
Literatura	50

Skraćenice

3GPP (3rd Generation Partnership Project)

ATIS (Alliance for Telecommunications Industry Solutions)

BER (Bit Error Rate)

C2POWER (Cognitive Radio and Cooperative strategies for Power saving in multi-standard wireless devices)

DCI (Data Center Efficiency)

DRX (Discontinuous Reception)

DSL (Digital subscriber line)

DTX (Discontinuous Transmission)

EARTH (Energy Aware Radio and NeTwork TechNologies)

ECR (Energy Consumption Rating)

ECREX (Energy Consumption Rating over EXtended idle load cycle)

ECRVL (Energy Consumption Rating over Variable Load cycle)

ECRW (Energy Consumption Rating Weighted)

ETSI (European Telecommunications Standards Institute)

FEC (Forward-Error-Correction)

GUI (Graphical User Interface)

HSPA (High Speed Packet Access)

ICT (Information and Communications Technology)

ISP (Internet Service Provider)

ITU (International Telecommunication Union)

LTE (Long Term Evolution)

LTE-A (Long Term Evolution Advanced)

OPEX (Operating Expenses)

PL (Path Loss)

PUE (Power Usage Efficiency)

QoS (Quality of Service)

RF (Radio Frequency)

SINR (Signal to Interference and Noise Ratio)

TEEER (Telecommunication Equipment Energy Efficiency Ratio)

TEER (Telecommunication Energy Efficiency Ratio)

TGG (The Green Grid)

TREND (Towards Real Energy-efficient Network Design)

UE (User Equipment)

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)

WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access)

1. Uvod

Prateći razvoj mobilnih telekomunikacionih mreža očigledno je da mobilni servisi prenosa podataka postaju dominantni u odnosu na tradicionalne govorne servise. Mobilni paketski *voice* servisi su sve zastupljeniji, pa zajedno sa mobilnim *data*, video i TV servisima predstavljaju segment bez koga se svakodnevica gotovo ne može zamisliti. S druge strane, korisnici žele imati dostupnost svuda i uvijek, što, uz porast broja različitih servisa, vodi sve većim zahtjevima za propusnim opsegom, kapacitetom, brzinama prenosa, kao i većoj potrošnji električne energije. Stoga je jasno da je neophodno omogućiti rast ukupnog kapaciteta i generalno unapređenje performansi mobilnih mreža, kako bi mobilne širokopojasne, *data* i video, usluge bile na nivou zahtjeva korisnika, pri čemu istovremeno treba voditi računa i o troškovima odgovarajuće mrežne infrastrukture. Razvojem u tom pravcu, povećava se i potrošnja električne energije u telekomunikacionim mrežama, pri čemu se telekomunikaciona industrija nalazi pred izazovom ostvarivanja ekonomske održivosti širokopojasnih bežičnih komunikacija, uz istovremeno garantovanje kvaliteta korisničkih servisa. Pored toga, evidentan je i snažan društveni podsticaj za očuvanje životne sredine koji je naročito dobio na značaju u poslednjoj deceniji.

S tim u vezi, u ovom radu se razmatra danas veoma aktuelna tema – „zelene” telekomunikacije. Naime, intenzivan razvoj mobilnih komunikacionih sistema i njihova sveprisutnost u svakodnevnom životu poslednjih godina neizbježno vode povećanju potrošnje električne energije. Pored ekonomskih razloga koji nedvosmisleno stoje iza potrebe efikasnije potrošnje energije, cilj „zelenih” telekomunikacija je da doprinesu očuvanju životne sredine, pa se upravo stoga velika pažnja usmjerava ka stvaranju novih, efikasnijih rješenja i tehnika kojima je moguće postići poboljšanje energetske efikasnosti u bežičnim telekomunikacionim sistemima. U ovom radu se razmatra jedno specifično rješenje kojim se otvaraju mogućnosti poboljšanja u mobilnim celularnim telekomunikacionim mrežama, sa aspekta energetske efikasnosti i ukupnih performansi sistema. Konkretno, za različite scenarije komunikacije, analiziraju se efekti implementacije femto baznih stanica (kao malih potrošača izvrsnih performansi) u konvencionalne mobilne makro celularne mreže, čime se ostvaruje nova heterogena, makro-femto arhitektura ovih mreža. Naime, konvencionalne

mobilne mrežne arhitekture sačinjavaju samo makro bazne stanice, velikih gabarita, veoma energetske zahtjevne. S druge strane, femto bazne stanice nemaju tako velike domete pokrivanja, ali zahtijevaju mnogo manje energetske resursa uz pružanje mnogo većih brzina prenosa, a samim tim i boljih usluga kada su u pitanju zahtjevi krajnjih korisnika. Predstavljene analize pokazuju da se upravo kreiranjem *two-tier* arhitekture, koja se dobija uvođenjem femto baznih stanica u konvencionalnu makro mrežnu arhitekturu, postižu dobri rezultati kada su energetska potrošnja i kvalitet servisa u pitanju.

U cilju utvrđivanja i upoređivanja energetske efikasnosti postojećih konvencionalnih mreža zasnovanih na makro ćelijama i novih makro-femto okruženja, u radu se razmatraju različite mrežne performanse: gubici na putu prostiranja signala, odnos između korisnog signala i interferencije i šuma, kapacitet sistema, protok i metrike kojima se opisuje energetska efikasnost mobilnih mreža. Pri tome, uvedene i opisane metrike su poslužile za poređenje energetske performansi različitih komponenti i sistema iste klase, za detaljnije istraživanje, prepoznavanje energetske parametara i prilagođavanje mrežnog okruženja energetske efikasnijoj arhitekturi. Konkretno, razmatraju se metrike koje daju: odnos utrošene energije i protoka, odnos broja korisnika i utrošene energije, odnos posebno specificiranih ključnih performansi mreže i potrošnje energije. Na taj način se dolazi do rezultata i vrijednosti za ključne performanse mobilnih ćelijskih mreža, s tim što se analitički dobijene vrijednosti verifikuju korišćenjem odgovarajućeg simulacionog alata. Simulatorom se, kroz jednostavan GUI (Graphical User Interface), realizuju različita urbana okruženja tako što se kao ulazni parametri koriste broj i raspored zgrada, ulica, makro i femto baznih stanica, makro i femto korisnika.

Ovaj rad je koncipiran na sljedeći način: u uvodu je opisan cilj rada i pregled istraživanja sadržanog u radu, u drugoj glavi su dati razlozi za uvođenjem novih mrežnih arhitektura, kao i opis mogućnosti koje nova heterogena arhitektura može pružiti. U trećoj glavi je dat pregled arhitekture „zelenih” mreža, način njihovog funkcionisanja i poboljšanja koje pružaju. Četvrta glava sadrži analizu performansi mobilnih mreža i prednosti koje se dobijaju uvođenjem femto mreža u tradicionalna mrežna okruženja kada su ulaganja, kapacitet, kvalitet servisa i protok u pitanju. Dobijeni numerički i simulacioni rezultati su objašnjeni u petoj glavi, kao i tok algoritma simulatora i poređenje rezultata u makro i u *two-tier* okruženju. U šestoj glavi je dat detaljan pregled metrika uvedenih sa ciljem utvrđivanja postignutog nivoa energetske efikasnosti, pri čemu su prikazana i odgovarajuća grafička poređenja. Najzad, u sedmoj glavi su izvedeni zaključci i dat još jedan osvrt na postignute rezultate i njihov značaj.

2. Koncept i arhitektura „zelenih“ mreža

Konstantan napredak bežičnih komunikacija pruža krajnjim korisnicima mogućnosti novih usluga i servisa koji često predstavljaju značajan iskorak u odnosu na njihove trenutno prepoznate potrebe. Ipak, takav intenzivan razvoj uključuje nove izazove i nova pitanja za rješavanje. Tako je jedan od problema koji treba riješiti porast potrošnje energije u ICT (Information and Communications Technology) infrastrukturi. Upravo mobilne bežične komunikacije imaju veliki doprinos u rapidnom povećanju obima ICT saobraćaja, zbog inovativnih usluga koje podržavaju najnovije mobilne platforme, čime se povećava i svakodnevni nivo potrošnje energije. Istraživanja takođe pokazuju da ICT tržište generiše oko 2% globalne emisije ugljen-dioksida sa efektom staklene bašte [1], s tim što se može očekivati da ovaj procenat i dalje raste ako se ne preduzmu hitne mjere za njegovo smanjenje.

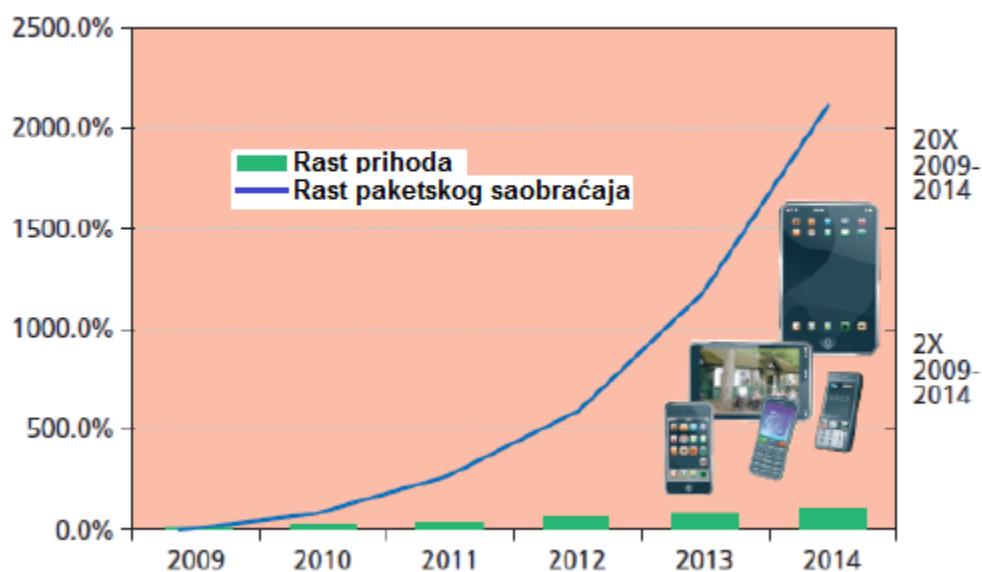
Po sadašnjim statistikama, preko četiri milijarde korisnika širom svijeta koristi mobilne terminale, privatno ili poslovno [2]. Jedna od ideja vodilja u mobilnim telekomunikacionim mrežama danas je razvoj u pravcu „zelenijih“ mreža. Na taj način se, pored uštede električne energije i postizanja sve većih brzina prenosa uz što manja ulaganja, doprinosi i smanjenju emisije ugljen-dioksida od strane mobilnih mreža. Stoga, organizacije za standardizaciju i mobilni operatori stalno rade na stvaranju novih, efikasnijih rješenja, arhitektura i tehnika kojim se omogućava implementacija koncepta „zelenih“ telekomunikacionih mreža. Konkretno, regulaciona tijela kao što su 3GPP (3rd Generation Partnership Project), ITU (International Telecommunication Union) i mobilni operatori veliku pažnju posvećuju inovacijama i istraživanjima na polju „zelenih“ bežičnih celularnih mreža. Generalno se može reći da zabrinutost i svijest o energetskej efikasnosti raste širom svijeta. Posebno je poslednja decenija bila period progresivnog rasta interesovanja o ovoj temi, a prvo istraživanje je objavljeno u 2001.godini [3]. Mnogi projekti sa ovom tematikom su realizovani ili su u fazi implementacije i to u saradnji vlada, akademskih institucija, istraživačkih centara i telekomunikacionih operatora i provajdera. Takođe, i Evropska komisija finansira istraživanja u tom pravcu, kroz mnoge nove projekte kao na primjer: EARTH (Energy Aware Radio and neTwork TecHnologies), TREND (Towards Real Energy-efficient Network Design) i C2POWER (Cognitive radio and cooperative strategies for power saving in multi-standard wireless devices) [3]. Većina ovih projekata stavlja akcenat na smanjenje potrošnje energije sa različitih nivoa: unapređenje komponenti sa naglaskom na pojačavačima snage i smanjenju unutrašnjih gubitaka, optimizacija arhitektura na nivou bazne stanice i

na mrežnom nivou, razvoj poboljšanih tehnika upravljanja energijom i šema prenosa, kao i istraživanja kooperativnih, koordinisanih i samoorganizovanih mehanizama prenosa. Generalni cilj istraživanja u okviru ovih projekata je smanjenje energetske potrošnje u telekomunikacionim mrežama za 50% u odnosu na trenutne troškove. Pri tome se radi na razvijanju energetske efikasne okruženja, „zelenih“ arhitektura, novih mehanizama za menadžment prilagodljivih varijacijama saobraćaja, razvoju inovativnih komponenti i novih radio i mrežnih protokola za bolje upravljanje resursima. Na taj način, „zelene“ bežične mreže postaju veoma široka istraživačka disciplina koja treba da obuhvati različite arhitekture sistema, pri čemu je važno identifikovati fundamentalne karakteristike mrežnih performansi i ukupne energetske potrebe. Stoga, sve veći interes regulatornih tijela i agencija u pogledu pitanja održivosti životne sredine i efikasnog korišćenja energetske resursa, predstavlja dodatnu pokretačku snagu za „zelene“ komunikacije.

U vezi sa tim, u ovom radu su predloženi novi „zeleni“ bežični mrežni scenariji, ukazano je na njihove perspektive i izazove, kao i na konkretne mogućnosti poboljšanja efikasnosti konvencionalnih mobilnih mreža. Izložena je procjena potrošnje ukupne energije u različitim okruženjima, kao i numeričke postavke i proračuni glavnih performansi za ta okruženja: gubitaka u radio prenosu signala, SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio), kapaciteta sistema, protoka u sistemu. Kroz sveobuhvatno kvantitativno i simulaciono istraživanje mobilnih scenarija predstavljen je okvir za procjenu potrošnje energije u mobilnim mrežama.

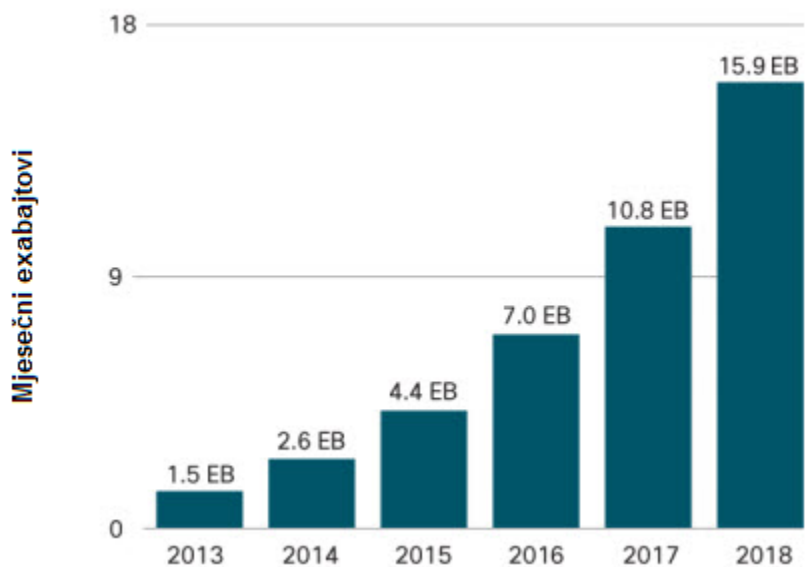
2.1. Analize i procjene o porastu paketskog saobraćaja

Prognoze ukazuju da će u 2015. godini prosječan *smart* telefon generisati više od 1GB saobraćaja mjesečno. Veliki raskorak u prihodima od mobilne industrije i porastu mobilnog paketskog saobraćaja posljednjih godina je dat na slici 1. Cisco prognoze su da će do kraja 2014. porast mobilnog saobraćaja u odnosu na početna mjerenja 2009. biti preko 2000% [4]. Sve to je praćeno rastom ulaganja u mrežnu opremu kako bi se zadovoljila stalno rastuća potražnja korisnika.



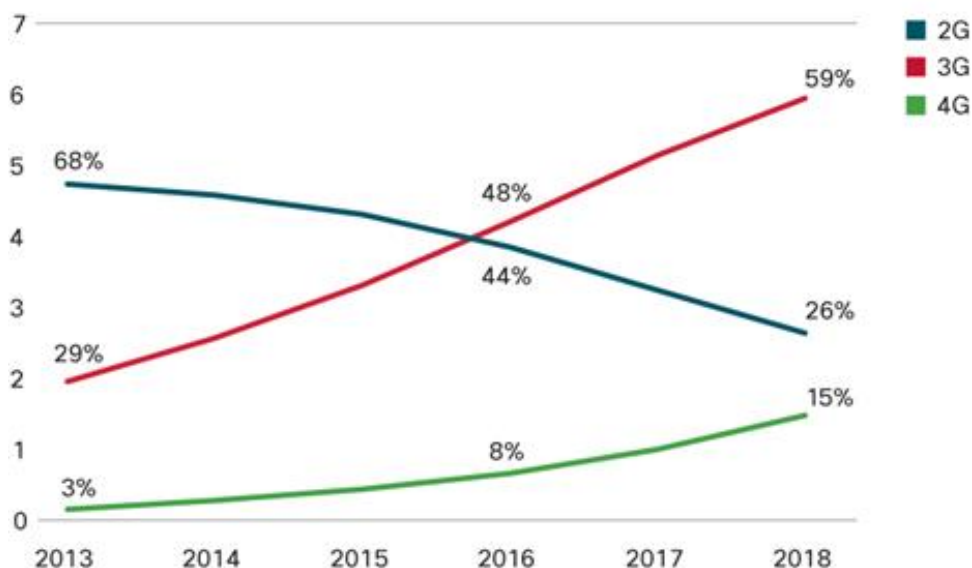
Slika 1. Porast paketskog saobraćaja od 2009. do 2014.godine

Kada se posmatra obim mobilnog paketskog saobraćaja u toku jednog mjeseca, uočava se da je dostignuto mjesečnih 1.5 extrabajta krajem 2013.godine, u odnosu na više od 820 petabajta mjesečno krajem 2012.godine. Prognoze o porastu mobilnog paketskog saobraćaja do 2018.godine su date na slici 2, gdje se pokazuje da će do 2018.godine mjesečni mobilni paketski saobraćaj preći 15 exabajta [4].



Slika 2. Prognoze o porastu mobilnog paketskog saobraćaja do 2018.godine

Preko pola milijarde (526 miliona) dodatnih mobilnih uređaja i konekcija je realizovano u 2013.godini, tj. ukupan broj uređaja i konekcija u 2013.godini je bio oko 7 milijardi, za razliku od 6.5 milijardi u 2012.godini. U 2013.godini 4G konekcije su generisale prosječno 14.5 puta više saobraćaja u odnosu na konekcije koje nisu bile na 4G mreži. Iako 4G konekcije predstavljaju oko 2.9% mobilnih konekcija, one već sada podržavaju oko 30% ukupnog mobilnog paketskog saobraćaja. Predviđanja o broju 2G, 3G i 4G konekcija do kraja 2018.godine su data na slici 3. Broj mobilnih konektovanih uređaja će premašiti broj ljudi na Zemlji do kraja 2014.godine, a predviđa se i da će do kraja 2018.godine biti preko 10 milijardi konektovanih uređaja na 7.6 milijardi ljudske populacije [5].



Slika 3. Broj konekcija u milijardama

Dosadašnja implementacija telekomunikacione infrastrukture pokazuje jasne trendove kad su u pitanju geografski regioni u razvoju koji se sve više opredjeljuju za mobilne bežične tehnologije, zaobilazeći fiksnu infrastrukturu. Od 2000. godine do sada, energetske troškovi u razvijenim regionima su se povećali za oko 200%, dok u zemljama u razvoju taj porast iznosi 1300%. Statistike takođe pokazuju da je u 2000. godini oko 40% svih mobilnih korisnika dolazilo iz zemalja u razvoju, s tim što je u međuvremenu ovaj procenat porastao na oko 70% [5].

Intenzivan porast implementacije mobilnih komunikacija u zemljama u razvoju može imati posebno nepovoljan efekat na potrošnju električne energije uslijed činjenice da u tim regionima dominiraju neefikasni izvori energije. Naime, udaljene lokacije obično se snadbijevaju neefikasnim

dizel generatorima, uvećavajući tako nivo emitovanog ugljen-dioksida. Sajtovi baznih stanica male potrošnje u urbanim sredinama zahtijevaju 3kW snage (70-80kWh energije za dvadesetčetvoročasovni rad) i prema procjenama generišu 11 tona ugljen-dioksida [6]. Bazne stanice u ruralnim oblastima zahtijevaju značajno veće snage jer pokrivaju veće površine. Istovremeno, energetske troškovi koje imaju mobilni telekomunikacioni operatori predstavljaju više od polovine njihovih ukupnih troškova poslovanja.

Upravo je to i razlog nastojanja operatora da se smanje energetske troškovi, čime se realizuje i smanjenje emisije ugljen-dioksida. Na primjer, Vodafone je postavio cilj da se smanji emisija ugljen dioksida za pola, jer se pokazalo da je njihova potrošnja energije i oslobađanja CO₂ porasla do 23% u posljednjih pet godina. Tabela I prikazuje energetske troškove i količinu emitovanog ugljen-dioksida u telekomunikacionim sistemima u Evropi i SAD-u u 2013. godini [6].

Tabela I: Energetske troškovi i CO₂ emisija u telekomunikacionim sistemima

Tržište	Broj sajtova	Troškovi energije po MWh	Godišnji operativni troškovi	Godišnja emisija ugljen-dioksida
Evropa	25 000	85 €	75 – 100 €	0.58 miliona tona
SAD	50 000	40 €	110 €	1.8 miliona tona

Za duplo veći broj sajtova u SAD-u, u odnosu na broj sajtova u Evropi, troškovi energije po MWh su skoro dva puta manji, međutim godišnja emisija ugljen dioksida je značajno veća. Kako bi se ostvarili ciljevi manje proizvodnje ugljen dioksida i manje potrošnje energije, svakako da prvo treba uzeti u razmatranje elemente koji predstavljaju najveće potrošače u mobilnoj telekomunikacionoj mreži, a potom razviti načine za ostvarivanje zadatih ciljeva.

2.2. Raspodjela energetske potrošnje u telekomunikacionoj mreži

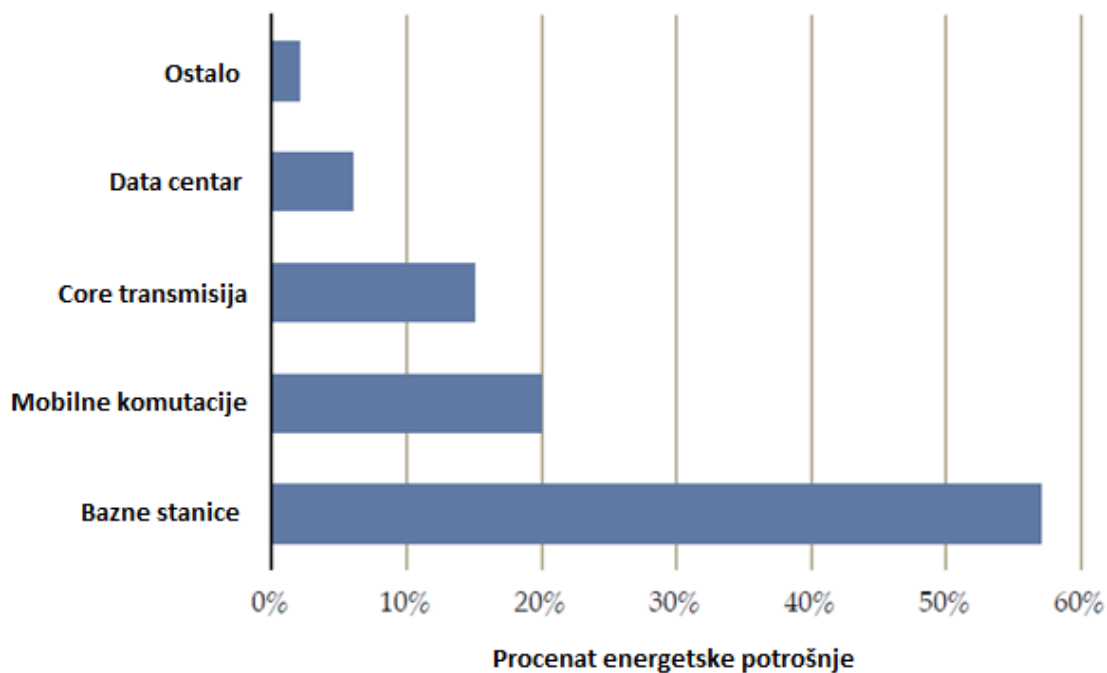
Tipična mobilna celularna mreža se sastoji od tri glavna elementa: okosnice mreže, prenosnog dijela i radio pristupnog dijela. U mreži, najveći dio potrošnje energije (od skoro 60%) odnosi se na radio pristupni segment, dok ostali elementi kao što su komutacioni uređaji, transmisija u *core-u*, potrošnja u *data* centrima, imaju mnogo manje učešće u energetskej potrošnji (slika 5). Upravo zbog toga, radio pristupna mreža pruža najveće mogućnosti uštede. U tom kontekstu, kad je potrošnja energije u pristupnom dijelu u pitanju, bazna stanica predstavlja najvećeg potrošača, pri čemu je učešće potrošnje različitih njenih segmenata dato na slici 6. Stoga, energetska efikasnost celularnih mreža u najvećoj mjeri zavisi upravo od efikasnosti bazne stanice, te značajnu ulogu ima odabir bazne stanice i optimalno planiranje mreže, uz obezbijedjivanje balansa između potrošnje energije i performansi baznih stanica. Tako je, kod tipične radio pristupne mreže, samo oko 10% baznih stanica odgovorno za skoro polovinu saobraćaja, dok 50% baznih stanica opslužuje samo 5% od ukupnog saobraćaja [7].

Generalno se može zaključiti da za veliku potrošnju energije od strane radio pristupne mreže postoje dva glavna razloga. Prvi je neefikasna konverzija energije izvora u transmisionu energiju bazne stanice, jer izlazni pojačavač snage troši između 50 i 80% uložene energije rasipajući značajnu količinu energije u vidu toplotne energije, dok manji dio predstavlja korisnu izlaznu snagu. Drugi razlog je činjenica da se saobraćaj u realnim uslovima ne može smatrati uniformnim, ni geografski ni vremenski gledano, pa se stoga troši važan procenat energije usljed nepotrebnog stalnog aktivnog rada bazne stanice.

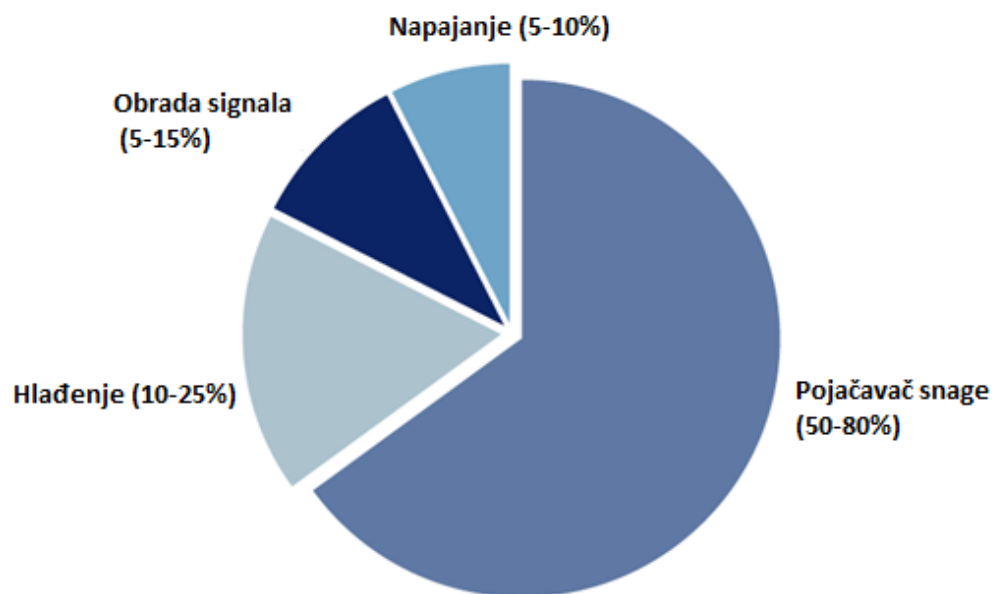
Imajući u vidu navedene razloge koji dovode do značajne potrošnje električne energije u pristupnom dijelu mobilnih telekomunikacionih mreža, brojna istraživanja su fokusirana na nalaženje rješenja za eliminisanje, odnosno ublažavanje, identifikovanih problema.

Međutim, iako su „zelene” mrežne arhitekture postale paradigma za rješavanje problema rasta potrošnje električne energije i negativnog uticaja na životnu sredinu, još uvijek je evidentan nedostatak eksplicitnih definicija, konkretnih mrežnih dizajna, solidnih osnova po pitanju energetske efikasnosti i metrika za mobilne celularne telekomunikacione mreže. Proširenje postojeće arhitekture u pristupnom dijelu sa konvencionalnim makro baznim stanicama vodi još većim troškovima CAPEX-a i OPEX-a, a

pritom ne zadovoljava korisničke potrebe za većim prenosnim brzinama, kao ni težnje za manjom potrošnjom električne energije, manjom proizvodnjom ugljen-dioksida i zdravijom životnom sredinom.



Slika 5. Potrošnja energije u mreži [8]



Slika 6. Procenat učešća potrošnje raznih segmenata bazne stanice [8]

To je i razlog intenzivnih istraživačkih napora u pravcu rješenja koja će uključiti nove arhitekture i mehanizme na različitim nivoima mreža (unutrašnje komponente, bazne stanice, planiranje radio pristupne mreže). S tim u vezi analiziraju se performanse novih ekonomičnijih baznih stanica, njihova raspodjela i drugačiji dizajn radio pristupne mreže. Jedno od rješenja koje posljednjih par godina dobija na značaju, odnosi se na modifikaciju postojeće konvencionalne makro arhitekture sa novim, ekonomičnijim mrežnim elementima zasnovanim na femto tehnologiji koja pruža mogućnost nadogradnje postojećih mreža bez velikog ulaganja, čime se izbjegava uvođenje novih makro baznih stanica velike potrošnje, skupe instalacije i skupog održavanja.

2.3. Konvencionalne celularne telekomunikacione mreže

Sadašnje celularne bežične mreže su tipično homogene, makro centralizovane arhitekture. Homogena celularna mreža se sastoji od makro baznih stanica sa planiranim rasporedom i setom mobilnih korisnika, pri čemu sve bazne stanice imaju slično zadate nivoe transmisione snage, tipična antenska setovanja, pragove šuma za predajnike i sličnu *backhaul* konektivnost ka *core*-u mreže. Ovakve makro bazne stanice su statične konfiguracije, nemaju mogućnost da prilagode svoj radni režim aktivnom broju korisnika i stalno rade na istim nivoima snage. Uslijed stalne težnje da se poveća kapacitet u mreži jedan od načina je ulaganje u nove makro sajtove. Međutim, uvođenjem novih makro sajtova dovodi do veće vjerovatnoće interferencijskih smetnji u urbanim regijama, velikih troškova ulaganja u nove gabaritne makro sajtove, troškova planiranja, instalacije, održavanja i značajne potrošnje električne energije. Dodatno, i pored toga što troše veliku količinu energije ne obezbjeđuju velike brzine prenosa, kao ni dobro pokrivanje u zatvorenim prostorijama, u kojima korisnici provode većinu vremena. Takođe, treba imati na umu da su tradicionalne makro mreže inicijalno dizajnirane za obezbjeđivanja govornog servisa i teško prate trend za sve većim zahtjevima za paketskim servisima, pogotovo kada su brzine prenosa u pitanju. Stoga, kako bi dobili što veće benefite sa energetskeg aspekta i sa aspekta što boljeg servisa treba se koncentrisati na rekonfiguraciju postojećih mobilnih celularnih telekomunikacionih mreža.

Na nivou mreže, potencijal za smanjenje potrošnje energije leži u arhitekturi mreže i njenom upravljanju. Energija potrebna za funkcionisanje mreže se mora posmatrati kao funkcija veličine ćelije i topologije, za datu raspodjelu saobraćaja i tip okruženja koji varira od gusto naseljenih urbanih područja do ruralnih oblasti. U razmatranje se moraju uzeti broj, raspored baznih stanica, sektorizacija, nagib antene i razmještaj antena. Tamo gdje su konvencionalne makro celularne mreže manje efikasne i neekonomične treba staviti akcenat na drugačiju implementaciju baznih stanica.

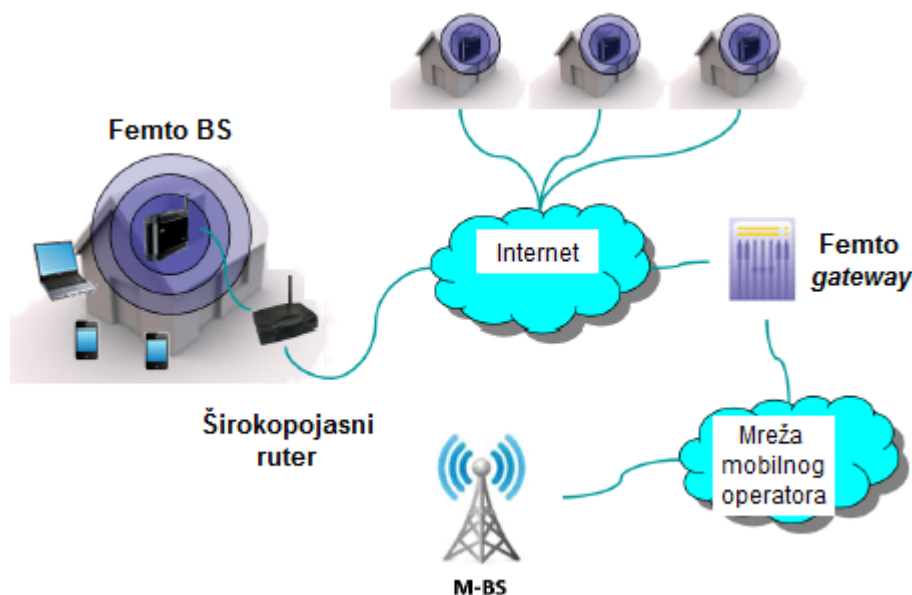
Makroćelije su generalno dizajnirane za obezbeđivanje velikog pokrivanja, a i nijesu efikasne kada su u pitanju veliki protoci. Zato su heterogene mreže sa hijerarhijom baznih stanica postale interesantne za sisteme mobilnih komunikacija narednih generacije i postizanje željenog kapaciteta i protoka. Konkretno, to se postiže uvođenjem heterogenih *two-tier* arhitektura, tj. implementacijom femto baznih stanica u makro mreže, čija se ekonomičnost ogleda u tome što su u pitanju male bazne stanice, male snage, kratkog dometa (10 - 50m) i koriste već postojeću infrastrukturu uz male izmjene i nadgradnju, a pružaju ubjedljivo bolji kvalitet usluge i brzine prenosa.

2.4. *Two-tier* celularne telekomunikacione mreže

Two-tier celularna bežična mreža podrazumjeva heterogeno okruženje koje čine makro i femto sajtovi. Kako je to već naglašeno, razlog za uvođenje femto sajtova u konvencionalne makro mreže su prednosti femto tehnologije koje se ogledaju u manjoj potrošnji energije i niskim troškovima održavanja (u poređenju sa onima kod makro baznih stanica), većim brzinama prenosa podataka i boljim QoS (Quality Of Service).

Femto tehnologija je jednostavna, skalabilna, relativno jeftina, a omogućava radio pokrivanje kroz postojeću bežičnu tehnologiju. Ona kombinuje postojeće konvencionalne mobilne i Internet tehnologije: obično se femto bazna stanica povezuje na širokopojasni Internet ruter, kao što je na primjer xDSL ruter, i kompatibilna je sa svim tipovima mobilnih terminala. Femto tehnologija obezbjeđuje bežični prenos glasa i druge paketske servise (*data* i *video*) u kombinaciji sa postojećim tehnologijama kao što su UMTS, WiMAX, HSPA, LTE .

Naravno, jasno je da se mora napraviti adekvatno planiranje mreže da ne bi došlo do kontraefekata, sa stanovišta energetske efikasnosti i sa stanovišta interferencije, ukoliko bi femto bazne stanice implementirali nasumično i u velikom broju. Stoga je važno voditi računa o koordinaciji između ćelija, pa kod modifikovane nove makro-femto arhitekture, koja nosi ime *two-tier* arhitektura, raspodjelu makro i femto baznih stanica treba podijeliti u dva regiona: unutrašnji i spoljašnji. Da bi se, na primjer, optimalno pokrila radio signalom neku teritorija u obliku šestougla treba voditi računa kako rasporediti makro i femto bazne stanice. U unutrašnjem regionu šestougla treba da dominira snaga makro bazne stanice, dok se femto bazne stanice smještaju u spoljašnji region, na ivicama makro pokrivanja, ili u regionima gdje postoje „rupe“ u makro pokrivanju, kao što je *indoor* pokrivanje. Naime, prema statistikama [8], mobilni korisnici oko 60-70% vremena provode u zatvorenim prostorijama. Međutim, *indoor* pokrivanje je vrlo zahtjevno za postojeće makro mreže zbog kompleksnog okruženja i velikih gubitaka usljed mnogobrojnih prepreka na putu prostiranja signala. Zato *indoor* sredine predstavljaju oblasti u kojima postoje „rupe“ u pokrivanju i idealne su za implementaciju femto baznih stanica. Time se postiže optimalna heterogena makro-femto arhitektura mreže (slika 4).



Slika 4. Prikaz *two-tier* celularne mreže

Na slici uočavamo da femto bazna stanica (femto BS) opslužuje mobilne terminale u zatvorenom prostoru - kući, pri čemu je vezana na postojeći kućni širokopojasni ruter. Ostatak mreže iza rutera ostaje isti kao i prije implementacije femto baznih stanica, s tim što u IP okosnici mreže treba definisati IP adresni opseg u kome bi se nalazile femto bazne stanice, kao i njihov *gateway* [9].

Kako se femto bazne stanice uglavnom koriste u zatvorenom okruženju, rastojanje između bazne stanice i mobilnog terminala je relativno malo, pa je smanjena i potrebna emisiona snaga. Samim tim i potrošnja energije je manja, čime se produžava i radni vijek baterije mobilnih terminala. Zatim, prednost postojanja malih ćelija u heterogenim mrežama je u tome što uglavnom koriste više frekvencije i obezbjeđuju veće brzine prenosa. S druge strane, implementacija samo malih ćelija može biti neekonomična zbog ograničavajućeg broja baznih stanica male snage i kratkog dometa. Stoga, potencijal za smanjenje potrošnje energije leži u optimalnoj makro-femto topologiji mreže i njenom upravljanju. U suštini, jasno je da se navedenim heterogenim *two-tier* okruženjem postiže da makro bazne stanice obezbjeđuju veliku pokrivenost, dok femto bazne stanice direktno utiču na poboljšanje performansi mreže. Međutim, da bi se implementacijom femtoćelija u postojeće mreže dobili značajni pomaci i optimalni energetske rezultati, potrebno je veoma pažljivo, planski izanalizirati novu mrežnu arhitekturu i egzaktno definisati sve *inpute* i *outpute* koji se dobijaju nadogradnjom postojećih makro mreža sa femto baznim stanicama. Jedino tako nova makro-femto, *two-tier* arhitektura može da ima željena energetska i performansna poboljšanja.

3. Performanse *two-tier* mreža

U cilju analize energetske potrošnje u mobilnim celularnim mrežama i mogućnosti za njeno smanjenje, u ovom radu se razmatra modifikovana mrežna arhitektura zasnovana na kombinaciji makro i femto baznih stanica. Pošto konvencionalne makro mrežne arhitekture nisu optimalno rješenje ni sa stanovišta sve složenijih servisa i aplikacija koje zahtijevaju velike brzine prenosa, jasno je da je neophodno uložiti dodatne napore i u cilju poboljšanja performansi postojećih mreža zasnovanih na makro baznim stanicama. Upravo u tom kontekstu se i analizira rješenje koje je zasnovano na modifikaciji konvencionalne mrežne arhitekture u pravcu implementacije heterogenih *two-tier* mreža koje uključuju dvije vrste baznih stanica: makro i femto bazne stanice.

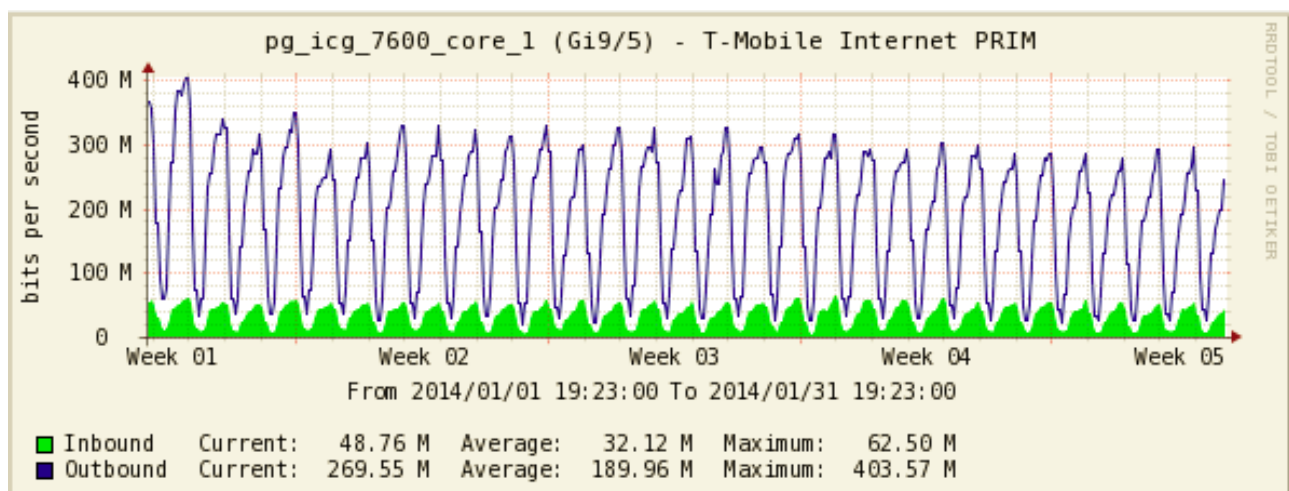
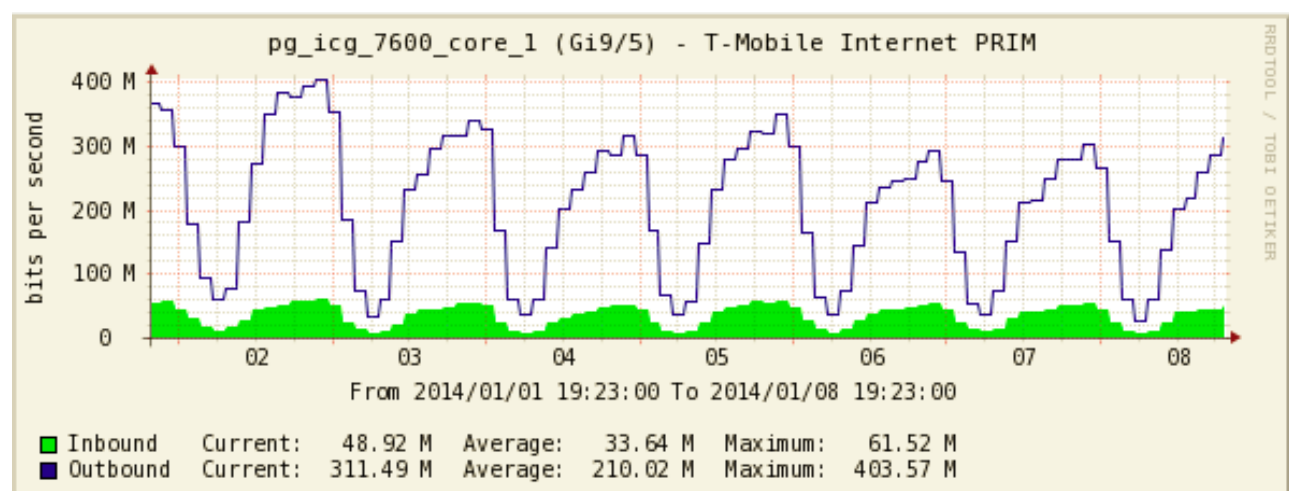
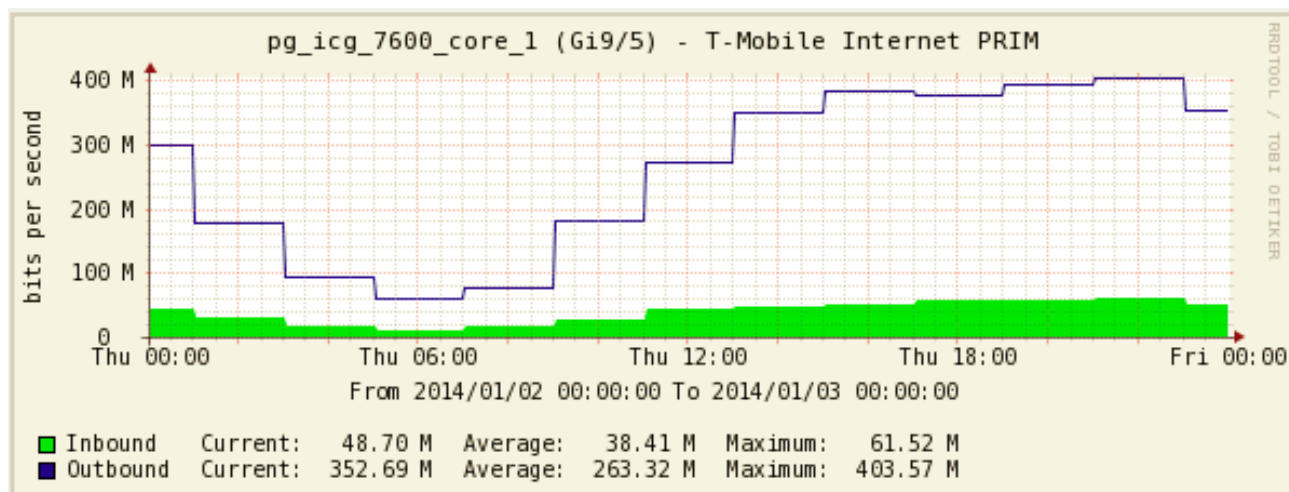
Pri tome su izvršeni odgovarajući numerički proračuni za različite režime rada femto bazne stanice, kako bi se izveli zaključci o mogućnostima energetske uštede koje pruža adekvatno prilagođavanje režima rada bazne stanice trenutnom obimu saobraćaja u sistemu. Naime, kako mobilni telekomunikacioni sistem ima periode većeg i manjeg opterećenja, nije racionalno statično konfigurisati nivo snage bazne stanice, već on treba biti dinamički prilagodljiv trenutnom opterećenju u sistemu. Zato je u narednom poglavlju pokazano kako se dinamičkom konfiguracijom mobilni telekomunikacioni sistem može učiniti produktivnijim. Potom, pored analize opterećenja u mreži i definicije relacija vezanih za potrošnju energije pri različitim režimima rada bazne stanice, važno je analitički definisati osnovne parametre koji utiču na performanse sistema: gubitke u prenosu signala, SINR, kapacitet i protok u sistemu. Na taj način će biti stvoreni uslovi za kreiranje cjelokupne slike o funkcionisanju razmatranih telekomunikacionih sistema, njihovom kvalitetu rada i mogućnostima energetske uštede koja se ostvaruje modifikacijama konvencionalne mrežne arhitekture. Upravo je to i fokus ovog istraživanja u kome se razmatraju numeričke i simulacione vrijednosti pomenutih performansi u različitim scenarijima sa ciljem da se utvrdi mogućnost poboljšanja postojeće, konvencionalne makro mrežne arhitekture.

3.1. Režimi rada bazne stanice kao funkcija opterećenja u mreži

Uprkos činjenici da opterećenje mobilne mreže u toku vremena varira, današnje mreže se konfigurišu dosta statično. Kako bi se napravio adekvatan kompromis između opterećenja i energetske potrošnje u *two-tier* bežičnim mobilnim celularnim mrežama, potrebno je posmatrati protok u mobilnoj mreži operatora u toku dana, sedmice, mjeseca.

U tu svrhu može poslužiti primjer raspodjele opterećenja u mreži Crnogorskog Telekoma, koji je prikazan na slici 7. Kao što se sa grafika vidi, opterećenje mreže je nejednako raspoređeno u ćelijama i vremenski promjenljivo. Ono po prirodi ima stohastičke karakteristike i pokazuje varijacije tokom različitih vremenskih perioda. Za energetske efikasno funkcionisanje, menadžment mreže mora da uzme u obzir profil opterećenja, kao i dinamičke fluktuacije saobraćaja. Cilj značajnog broja baznih stanica je da obezbijede pokrivenost, ne radeći punim kapacitetom, pogotovo ne u časovima kada nema punog opterećenja. Tokom perioda sa nižim nivoom saobraćaja gotovo sve bazne stanice rade niskim kapacitetom, ili čak ne opslužuju nijednog korisnika. Nažalost, energetska efikasnost baznih stanica je posebno loša u ovakvim okolnostima što se može pripisati činjenici da na fizičkom nivou efikasnost pojačavača snage znatno opada kada je mala izlazna snaga. S druge strane, na nivou linka, sistemske informacije, sinhronizacija i pilot signali moraju se kontinuirano prenositi, pa se od bazne stanice zahtijeva da stalno bude uključena [10].

Nema nikakve dileme da je, u cilju što veće efikasnosti bazne stanice, potrebno da bazna stanica ima mogućnost prilagođavanja svog rada, a samim tim i energetske potrošnje, uslovima opterećenja u mreži. Za razliku od konvencionalne makro tehnologije, femto bazna stanica ima mogućnost detekcije korisnika u okolini i prilagođenja nivoa snage u zavisnosti od broja korisnika i obima saobraćaja. Kako bi utvrdili ekonomičnost femto tehnologije u zavisnosti od opterećenja u mreži, u ovom istraživanju su izvršeni odgovarajući numerički proračuni za dva režima rada femto bazne stanice: statički i dinamički. Statički režim podrazumijeva konstantan, aktivan rad femto bazne stanice, nezavisno od intenziteta saobraćaja. Dinamički režim podrazumijeva prilagođavanje rada femtoćelije trenutnom intenzitetu saobraćaja.

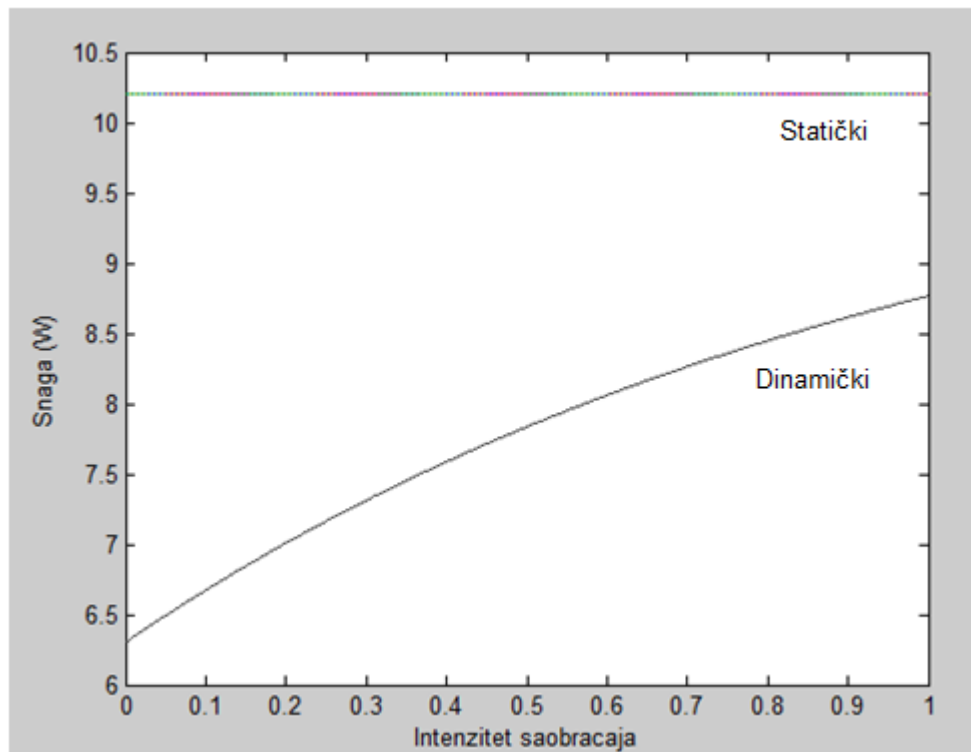


Slika 7. Opterećenje u mobilnoj mreži Crnogorskog Telekomu u toku dana, sedmice i mjeseca

Da bi se stekao uvid u razlike između statičkog i dinamičkog načina rada može se uzeti primjer tipične femto bazne stanice u različitim stanjima – aktivnom, *idle* i *sniff*. *Idle* stanje podrazumijeva da se bazna stanica nalazi u režimu rada kada ne vrši radio transmisiju, a i *sniff* stanje podrazumijeva da su sve funkcije bazne stanice, osim kontrolnih, isključene. Statički način rada podrazumijeva da je femto bazna stanica stalno u aktivnom režimu, dok je kod dinamičkog rada omogućeno prilagođavanje bazne stanice intenzitetu saobraćaja.

Vjerovatnoća da se femto bazna stanica nalazi u aktivnom stanju je $1 - e^{-\rho}$, gdje je intenzitet saobraćaja $\rho = \lambda / \mu$, λ srednja brzina dolaska korisnika u region pokrivanja femto bazne stanice, μ srednja brzina odlaska korisnika iz regiona pokrivanja, tj. $1/\mu$ predstavlja srednje vrijeme opsluživanja korisnika. Za dinamički režim rada snaga koju razvija femto bazna stanica je data sa [11]:

$$P_{\text{din}} = P_{\text{akt}}(1 - e^{-\rho}) + (P_{\text{idle}} + P_{\text{sniff}})e^{-\rho} \quad (21)$$



Slika 8. Snaga kao funkcija intenziteta saobraćaja za statički i dinamički režim rada femto bazne stanice

Na slici 8 je prikazano poređenje navedena dva režima rada femto bazne stanice u pogledu snage koju razvija femto bazna stanica pri opsluživanju različitog broja korisnika, odnosno pri različitom intenzitetu saobraćaja koji varira od vrijednosti 0 do 1. Očigledno je da su, kao što se moglo i očekivati, razlike između statičkog i dinamičkog režima rada značajne.

Naime, statički režim rada podrazumjeva konstantnu potrošnju energije, bez obzira na intenzitet saobraćaja. Bilo da bazna stanica opslužuje nijednog, jednog ili više korisnika stalno se angažuje ista snaga. Dinamički način rada donosi znatne uštede jer se režim rada bazne stanice prilagođava intenzitetu saobraćaja. Stoga je jasno da se pri manjem intenzitetu saobraćaja štede značajni energetske resursi.

3.2. Gubici u prenosu signala

Kada se razmatraju gubici nastali prilikom prenosa signala, treba imati u vidu činjenicu da mobilni radio kanal unosi fundamentalna ograničenja performansi mobilnih radio sistema. Prenos signala mobilnim radio kanalom se odvija u specifičnom ambijentu koji podrazumijeva prisustvo velikog broja najrazličitijih prepreka. Radio signal koji se emituje između fiksne bazne stanice i mobilne jedinice prostire se po mehanizmu koji zavisi od talasne dužine prenošenog signala i okruženja u kome se komunikacija odvija. U najvećem broju slučajeva signal se prostire po više putanja. Sve ovo ima za posljedicu pojavu niza specifičnosti koje se odnose na gubitke usljed propagacije i raspodjelu prijemnog polja. Generalno govoreći, signal koji se prenosi mobilnim radio kanalom nije izložen slabljenjima samo u onim oblicima kakvi se javljaju kod ostalih vidova prostiranja putem radio talasa. Bilo da se radi o ruralnoj ili urbanoj okolini, objekti različite veličine predstavljaju prepreke na kojima dolazi do rasijanja emitovanog talasa, kao i do pojave jednog ili više reflektovanih radio talasa. Na raspodjelu prijemnog polja utiču i prirodne prepreke, kao i profil trase po kojoj se kreće mobilna jedinica. Svi pomenuti efekti u mobilnom radio kanalu se modeliraju fedingom, kao pojavom koja objedinjava različite manifestacije kako na nivou anvelope signala na mjestu prijeme, tako i na nivou srednje vrijednosti ukupne primljene snage.

Feding sačinjavaju dvije komponente koje se mogu statistički razdvojiti: spori i brzi feding. Do efekta sporog fedinga dolazi uslijed nepravilnog profila trase i prepreka na putu prostiranja signala koji dovode do varijacija srednje vrijednosti nivoa polja. Mjerenja pokazuju da su promjene srednjeg nivoa polja povezane sa rastojanjem između bazne stanice i mobilne jedinice, visinom antene bazne stanice, frekvencijskim opsegom, orijentacijom ulica, brda, prisutnosti vodenih površina. S druge strane, brzi feding je rezultat refleksija prenošenog signala od lokalnih prepreka koje se nalaze u blizini prijemnog mobilnog terminala, kao što su zgrade, kuće i druge građevinske strukture ili prirodne prepreke, kao na primjer šume. Uslijed takvih refleksija nastaju varijacije nivoa primljenog signala koji se predstavlja kao funkcija vremena ili prostora. Obično se prikazivanje vrijednosti nivoa primljenog signala u domenu vremena koristi za analizu pojave fedinga, dok se prikazivanje vrijednosti nivoa primljenog signala u domenu prostora koristi za analizu gubitaka u prenosu usljed prostiranja signala.

Generalno se može reći da, usljed pomenutih prepreka na putu i materijala od koga su prepreke napravljene, dolazi do fenomena refleksije, rasijanja i difrakcije koji utiču na smanjenje kvaliteta prenošenog signala. Poseban izazov predstavlja *indoor* pokrivanje, gdje svi navedeni razlozi dovode do značajnog slabljenja radio signala na prijemu. Sve to čini postupak modelovanja mobilnog radio kanala najkompleksnijim dijelom projektovanja mobilnih radio sistema. Ovaj proces se najčešće bazira na primjeni teorije slučajnih procesa, kao i djelimično na rezultatima egzaktnih mjerenja sprovedenih na konkretnim sistemima i frekvencijskim opsezima.

U analizama gubitaka koji nastaju pri prostiranju od izvora signala do njegove destinacije, moraju se uzeti u obzir različiti faktori, uključujući i relevantne propagacione modele. U tom kontekstu, kad su razmatrane *two-tier* femto mreže u pitanju, propagacija signala se opisuje korišćenjem različitih modela u zavisnosti od okruženja u kome se komunikacija odvija:

- *outdoor-to-outdoor* propagacioni model za makroćelije podrazumijeva da se makro bazna stanica i mobilna jedinica koju ona opslužuje nalaze u *outdoor* okruženju
- *outdoor-to-indoor* propagacioni model za makroćelije podrazumijeva da se makro bazna stanica nalazi u *outdoor* okruženju, a mobilna jedinica koju ona opslužuje u *indoor* okruženju
- *indoor-to-indoor* propagacioni model za femtoćelije podrazumijeva da se femto bazna stanica i mobilna jedinica koju ona opslužuje nalaze u *indoor* okruženju
- *indoor-to-outdoor* propagacioni model za femtoćelije podrazumijeva da se femto bazna stanica nalazi u *indoor* okruženju, a mobilna jedinica koju ona opslužuje u *outdoor* okruženju.

U situacijama kada se prostiranje signala najbolje opisuje *outdoor-to-outdoor* propagacionim modelom, gubici snage pri prenosu signala između MBS-a (makro bazne stanice) i MJ-a (mobilne jedinice) dati su jednačinom [12]:

$$PL(dB) = 15.3 + 37.6 \log_{10} R \quad (1)$$

gdje je R udaljenost između predajnika i prijemnika izražena u metrima.

U slučaju *outdoor-to-indoor* komunikacionog okruženja, gubici prostiranja između *outdoor* MBS-a i MJ-a, koji predstavlja u stvari *indoor* korisnika kojeg opslužuje pomenuta MBS, dati su sa [12]:

$$PL(dB) = 15.3 + 37.6 \log_{10} R + L_{SZ} \quad (2)$$

gdje je R udaljenost između predajnika i prijemnika izražena u metrima, L_{SZ} su gubici usljed penetracije kroz osnovne spoljašnje zidove.

Kada je u pitanju *indoor-to-indoor* okruženje, model gubitaka prostiranja između FBS-a (femto bazne stanice) i MJ-a je dat relacijom [12]:

$$PL(dB) = 38.46 + 20 \log_{10} R + 0.7d + 18.3n^{((n+2)/(n+1)-0.46)} + qL_{UZ} \quad (3)$$

gdje je n broj plafona kroz koje prolazi signal, q je broj zidova u prostorijama između FBS-a i MJ-a, L_{UZ} su gubici kroz unutrašnje zidove koji razdvajaju prostorije. $0.7d$ je vrijednost vezana za gubitke usljed penetracije kroz zidove u prostoriji.

U slučaju *indoor-to-outdoor* komunikacionog ambijenta, FBS se nalazi u *indoor* sredini, dok je MJ u *outdoor* sredini, pa se pored gubitaka kroz unutrašnje zidove (L_{UZ}) dodatno razmatraju i gubici kroz spoljašne zidove (L_{SP}) [12]:

$$PL(dB) = \max(15.3 + 37.6 \log_{10} R, 38.46 + 20 \log_{10} R) + 0.7d + 18.3n^{((n+2)/(n+1)-0.46)} + qL_{UZ} + L_{SP} \quad (4)$$

Navedenim relacijama su kvantitativno definisani gubici u prenosu signala na putu prostiranja uzimajući u obzir različite tipove baznih stanica (makro i femto bazne stanice), tip okruženja (*indoor* ili *outdoor*), različite prepreke na putu (plafoni, pod, spoljašni i unutrašnji zidovi). Na taj način se dobija osnova za definisanje preostalih parametara koji utiču na performanse sistema: SINR, kapacitet i protok.

3.3. SINR

Kvalitet prenosa signala u digitalnim telekomunikacionim mrežama zavisi od različitih spoljašnjih uticaja. Za kvantitativno određivanje nivoa tih uticaja treba uzeti u obzir učešće svih superponiranih smetnji i degradacija. U tom kontekstu, razmatranja treba da budu usmjerena na sledeće dvije kategorije smetnji koje mogu uticati na kvalitet prenosa signala: šum i interferencija.

Kada je šum u pitanju akcenat se stavlja na bijeli Gausov šum, koji je dominantan uzročnik degradacionih smetnji, dok se kod interferencije razmatraju različiti vidovi: interferencija između makroćelija, femtoćelija i makroćelija, kao i između samih femto ćelija, odnosno sajtova. Kada femtoćelije i makroćelije rade na istim frekvencijama postoji velika šansa da dođe do interferencije. Kako je u ovom radu relevantno razmatrati one vidove koji su direktna posledica modifikovane arhitekture, odnosno uvođenja femtoćelija, glavne forme interferencije koje se pojavljuju kod *two-tier* makro-femto mreža su: femto bazna stanica koja interferira sa makro baznom stanicom na istoj frekvenciji, makro-femto interferencija u slučajevima kada se mobilni terminal kog opslužuje makro bazna stanica se nalazi mnogo bliže femto baznoj stanici nego makro baznoj stanici, femtoćelije koje interferiraju međusobno u slučaju kada imamo više femto baznih stanica koje su jedna blizu druge. Sve ovo vodi povećanju nivoa interferencije.

Postoji više tehnika za smanjivanje uticaja kako šuma, tako i različitih vidova interferencije, na kvalitet prenosa signala u bežičnim mobilnim telekomunikacionim mrežama. Neke od tehnika koje stoje na raspolaganju su:

- adaptivna kontrola snage predstavlja slučaj kada femto bazna stanica detektuje signale koje šalju okolni uređaji i na osnovu njih prilagođava svoj predajni nivo snage i kontroliše svoje pokrivanje;
- dinamički nadzor prijemnog dobitka je slučaj kada se koristi automatsko smanjivanje ili povećavanje prijemne snage signala, u zavisnosti od kvaliteta signala i odnosa signal-šum;
- *uplink* ograničenje snage od strane mobilnog terminala predstavlja tehniku kod koje se postavlja limit za maksimalnu snagu signala koju može da zrači mobilni terminal u femtoćelijskom okruženju;

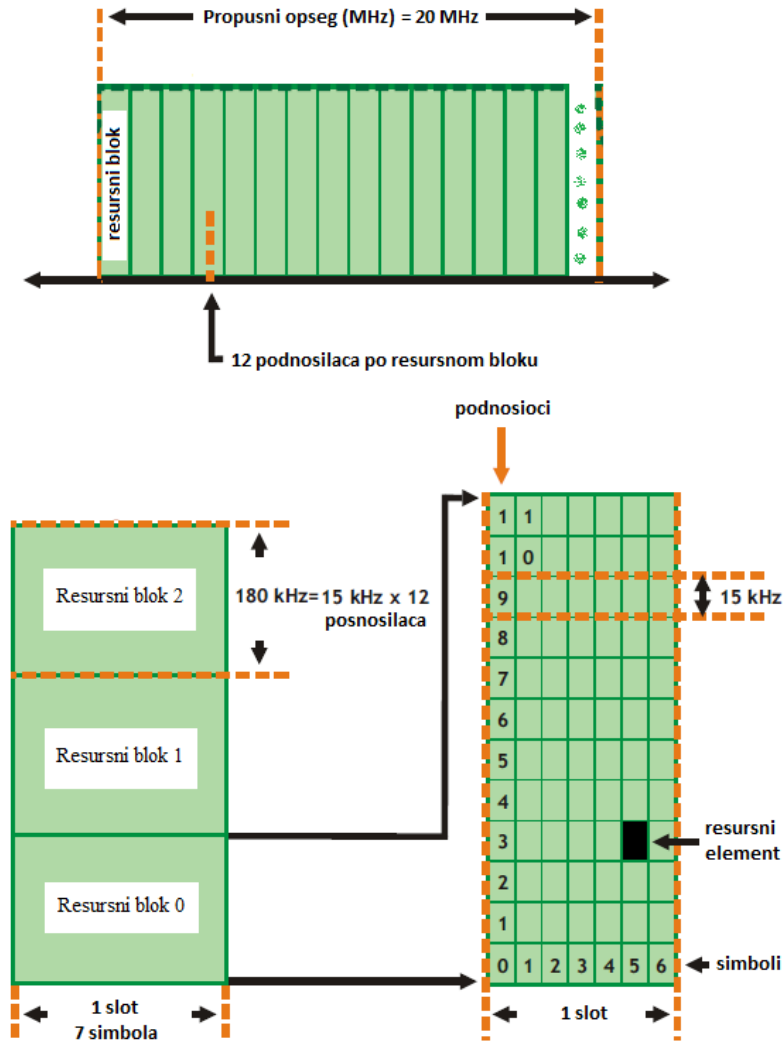
- dinamičko prilagođenje prijemne snage femto bazne stanice: mobilni terminal kog opslužuje makro bazna stanica se nalazi mnogo bliže femto baznoj stanici nego makro baznoj stanici, a pritom treba da zadovolji minimalni predajni nivo snage za normalan rad; stoga, kako bi nesmetano funkcionisala, femto bazna stanica mora imati mogućnost dinamičkog smanjivanja prijemne snage u prisustvu bliske makro mobilne jedinice.

Sve ove tehnike manje ili više umanjuju negativan uticaj šuma i interferencije. S tim u vezi, važno je definisati koji parametri imaju direktan uticaj na pojavu degradacija performansi korisnog signala, kako bi i tehnike bile efikasnije primjenjive u različitim scenarijima. Zato se uvode analitičke relacije za SINR, koje sadrže neophodne parametre za definisanje odnosa između korisnog signala i signalnih smetnji, odnosno šuma i interferencije.

S obzirom da se u radu analiziraju scenariji u kojima egzistiraju i makro i femto bazne stanice, potrebno je definisati prijemni SINR za različite tipove korisnika: makro i femto korisnike. Makro korisnik predstavlja mobilnu jedinicu koju opslužuje makro bazna stanica, dok femto korisnik predstavlja mobilnu jedinicu koju opslužuje femto bazna stanica.

Prije nego se analitički definiše SINR primljen od strane makro, kao i femto, mobilnog korisnika potrebno je uvesti dodatne pojmove, koju su ilustrovani na slici 9. Naime, u ovom radu posmatramo sistem sa 64 QAM modulacijom u kombinaciji sa WCDMA tehnikom višestrukog pristupa i na raspolaganju je frekvencijski opseg sistema od 20MHz.

Na primjeru sa slike, za posmatrani sistem je na raspolaganju 20MHz frekvencijskog opsega (propusni opseg sistema) koji se dijeli na manje jedinice - resursne blokove. Resursni blok zauzima 180kHz po jednom slotu (od 7 simbola), a jedan resursni blok se dijeli na 12 podnosilaca koji zauzimaju po 15kHz po slotu.



Slika 9. Ilustracija podjele propusnog opsega posmatranog sistema na manje elemente

Na osnovu prethodno datog pojašnjenja pojmova: resursni blok, slot i podnosilac, može se definisati jednačina primljenog SINR-a od strane m -tog makro mobilnog korisnika na k -om podnosiocu (svakom podnosiocu je dodijeljen jedan mobilni korisnik), pri čemu je prisutna interferencija između susjednih makro baznih stanica i susjednih femto baznih stanica [13]:

$$\text{SINR}_{m,k} = \frac{P_{M,k} G_{m,M,k}}{N_0 \Delta f + \sum_{M'} P_{M',k} G_{m,M',k} + \sum_F P_{F,k} G_{m,F,k}} \quad (5)$$

gdje $P_{M,k}$ [dBm] i $P_{M',k}$ [dBm] predstavljaju transmissionu snagu opslužujuće makro bazne stanice M i susjedne makro bazne stanice M' na podnosiocu k , respektivno. Dobitak kanala G dominantno zavisi

od gubitaka na putu prostiranja signala $G = 10^{-PL/10}$, pri čemu je $G_{m,M,k}$ [dBi] dobitak kanala između mobilne jedinice m i opslužujuće makro bazne stanice M na podnosiocu k . $G_{m,M',k}$ [dBi] je dobitak kanala između mobilne jedinice m i susjedne makro bazne stanice M' na podnosiocu k . Slično, $P_{F,k}$ [dB] je transmisiona snaga susjedne femto bazne stanice F na podnosiocu k . $G_{m,F,k}$ je dobitak kanala između mobilne jedinice m i susjedne femto bazne stanice F na podnosiocu k . N_0 je spektralna gustina snage bijelog šuma, Δf je frekvencijski razmak između podnosilaca.

Na sličan način se definiše SINR primljen od strane femto mobilne jedinice f na podnosiocu k u uslovima interferencije od strane susjednih makro baznih stanica i susjednih femto baznih stanica, pa je njegova vrijednost data sa [13]:

$$\text{SINR}_{f,k} = \frac{P_{F,k} G_{m,F,k}}{N_0 \Delta f + \sum_M P_{M,k} G_{m,M,k} + \sum_F P_{F',k} G_{m,F',k}} \quad (6)$$

Ovim su opisane osnovne relacije vezane za SINR koje će poslužiti za dalje definisanje kapaciteta i protoka koji se ostvaruju u celularnoj mobilnoj mreži.

3.4. Kapacitet i protok

Sledeći parametar bitan za procjenu ukupnih performansi razmatranih mobilnih celularnih mreža je njihov kapacitet, odnosno protok. Na osnovu definisanog SINR, mogu se odrediti i odgovarajući analitički izrazi za *downlink* protok makro i femto baznih stanica koje opslužuju pripadajuće mobilne jedinice, odnosno krajnje korisnike. Praktični kapacitet opslužujuće makro bazne stanice M , na podnosiocu k je dat sljedećom jednačinom [14]:

$$C_{M,k} = \Delta f \cdot \log_2(1 + \alpha \text{SINR}_{m,k}) \quad (7)$$

gdje je Δf rastojanje između podnosilaca, $\alpha = -1.5 / \log(5BER)$, BER (Bit Error Rate) predstavlja broj pogrešno prenijetih bita podijeljen sa ukupnim brojem prenijetih bita tokom posmatranog vremenskog intervala, a $SINR_{m,k}$ predstavlja odnos primljenog signala i interferencije plus šuma od strane m-tog makro mobilnog korisnika na k-om podnosiocu.

Ekvivalentno, kapacitet opslužujuće femto bazne stanice F na podnosiocu k je dat sljedećom jednačinom:

$$C_{F,k} = \Delta f \cdot \log_2(1 + \alpha SINR_{f,k}) \quad (8)$$

pri čemu $SINR_{f,k}$ predstavlja odnos primljenog signala i interferencije plus šuma od strane f-tog femto mobilnog korisnika na k-om podnosiocu.

Sada se protok makro bazne stanice može izraziti sa [14]:

$$T_M = N_{SpU} N_{bps} \sum_m \sum_k \beta_{m,k} C_{m,k} \quad (9)$$

gdje je N_{SpU} broj podnosilaca po korisniku, N_{bps} broj bita po simbolu, $\beta_{m,k}$ predstavlja pripadnost podnosioca makro mobilnoj jedinici. Za $\beta_{m,k}=1$ podnosilac k je pridružen makro mobilnoj jedinici m. Kod makroćelije u svakom vremenskom slotu, jedan podnosilac je dodijeljen samo jednoj mobilnoj stanici. To znači da je $\sum_{m=1}^{N_m} \beta_{m,k} = 1$, gdje je N_m broj mobilnih stanica u makroćeliji. Broj podnosilaca po korisniku se računa:

$$N_{SpU} = \frac{N_{SpRB} \cdot N_{RB}}{N_m} \quad (10)$$

gdje je $N_{SpRB} = 12$ broj podnosilaca po resursnom bloku, a N_{RB} je broj resursnih blokova.

Ekvivalentno, protok femto bazne stanice se može izraziti sa:

$$T_F = N_{SpU} N_{bps} \sum_f \sum_k \beta_{f,k} C_{f,k} \quad (11)$$

gdje $\beta_{f,k}$ predstavlja pripadnost podnosioca femto mobilnoj jedinici, pa za $\beta_{f,k}=1$ podnosilac k je pridružen femto mobilnoj jedinici f.

Ovim su definisane glavne relacije koje se tiču mrežnih performansi i stvoreni su uslovi za numeričke i simulacione proračune za konkretne mrežne scenarije.

4. Numerički i simulacioni rezultati

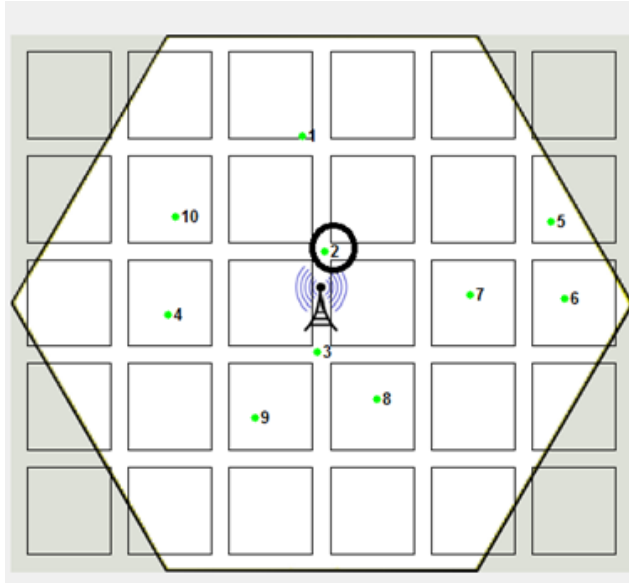
U cilju analize uticaja modifikovane arhitekture na performanse i energetska efikasnost celularnih bežičnih mobilnih telekomunikacionih mreža u radu se posmatraju dva specifična mrežna scenarija: prvi scenario (konvencionalni) predstavlja makro mrežnu arhitekturu sa makro baznim stanicama, dok drugi *two-tier* scenario predstavlja modifikovanu makro arhitekturu sa implementacijom femto baznih stanica. U analizi mrežnih performansi za ova dva scenarija prvo su izvršeni numerički proračuni na osnovu formulacija datih u prethodnoj glavi, a zatim je validnost numerički dobijenih rezultata provjerena kroz simulacioni alat, LTE-A Sim. U oba slučaja se polazi od pretpostavke da su u pitanju sistemi sa 64 QAM modulacijom u kombinaciji sa WCDMA tehnikom višestrukog pristupa i da se ima na raspolaganju frekvencijski opseg sistema od 20MHz [15].

4.1. Numerički proračuni

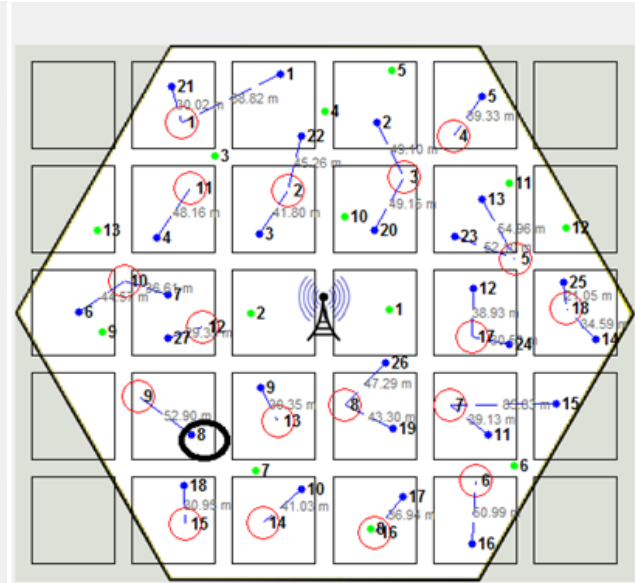
U cilju realizacije numeričkih proračuna za makro i *two-tier* mrežne arhitekture analiziraju se performanse definisane u prethodnoj glavi: gubici u prenosu signala, SINR, kapacitet i protok. Jednačine koje se koriste u proračunima su date relacijama (1) – (10). Posmatraju se dva urbana scenarija: prvi scenario (slika 10) predstavlja makro okruženje sa jednom makro baznom stanicom koja opslužuje deset makro korisnika, dok drugi scenario (slika 11) predstavlja *two-tier* okruženje sa makro baznom stanicom, osamnaest femto baznih stanica, trinaest makro korisnika i dvadeset sedam femto korisnika koji su slučajno raspoređeni. U oba slučaja uzima se urbano pravougaono okruženje sa 30 zgrada, između kojih su ulice širine 14m. Ostali parametri koji se koriste u proračunima su dati u Tabeli II.

U makro scenariju na slici 10 makro bazna stanica je u centru šestougla pokrivanja, deset makro korisnika označenih zelenom bojom su slučajno raspoređeni po šestouglu. U *two-tier* scenariju na slici 11 makro bazna stanica je takođe u centru šestougla, makro korisnici su raspoređeni u okviru šestougla

i označeni zelenom bojom, femto bazne stanice su označene crvenim krugovima, dok su femto korisnici označeni plavom bojom.



Slika 10. Makro scenario



Slika 11. Two-tier scenario

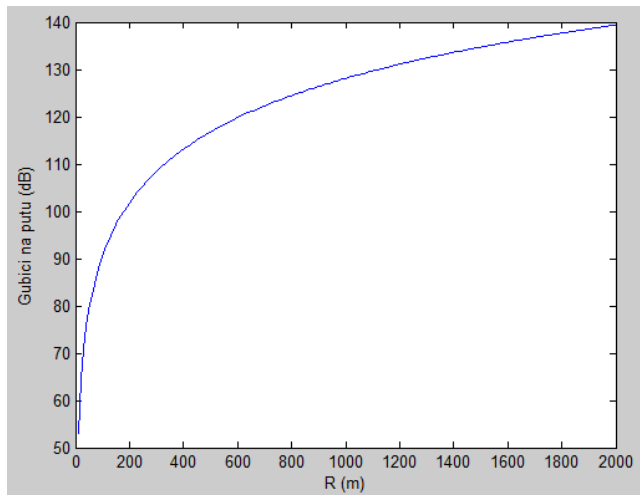
Tabela II: Parametri korišćeni u proračunima

Snaga MBS-a	46dBm
Snaga FBS-a	20dBm
Δf	15kHz
N_0	-174 dBm/Hz
BER	10^{-6}
N_{RB}	50
N_{SpRB}	12
N_{bps}	6
L_{UZ}	5 dB
α	0.283

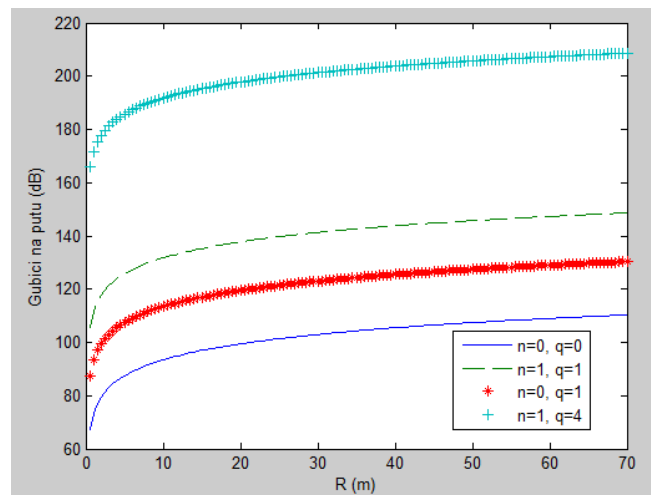
Za makro scenario analizira se slučaj makro korisnika koji se nalazi u *outdoor* okruženju, dok se za *two-tier* scenario analizira slučaj femto korisnika koji se nalazi u *indoor* okruženju. To znači da su relevantni: *outdoor-to-outdoor* propagacioni model za makro scenario, koji podrazumijeva da se makro bazna stanica i mobilna jedinica koju ona opslužuje nalaze u *outdoor* okruženju i opisan je

relacijom (1), i *indoor-to-indoor* propagacioni model za *two-tier* scenario, koji podrazumijeva da se femto bazna stanica i mobilna jedinica koju ona opslužuje nalaze u *indoor* okruženju i opisan je relacijom (3).

Za makro scenario sa *outdoor-to-outdoor* okruženjem, slika 12 prikazuje krivu gubitaka pri prenosu signala između makro bazne stanice i mobile jedinice u zavisnosti od različitih vrijednosti rastojanja R između makro bazne stanice i mobilne jedinice, pri čemu R uzima vrijednosti od 0 do 2000m.



Slika 12. Gubici prenosa za makro korisnika



Slika 13. Gubici prenosa za femto korisnika

Slično, za *two-tier* scenario sa *indoor-to-indoor* okruženjem kriva gubitaka pri prenosu signala između femto bazne stanice i mobilnog femto korisnika za različite vrijednosti rastojanja R između femto bazne stanice i mobilne jedinice data je na slici 13, pri čemu R uzima vrijednosti od 0 do 70m. Prilikom proračuna gubitaka kod ovog scenarija, uzima se u obzir i broj plafona n kroz koje prolazi signal, kao i broj zidova q u prostorijama između femto bazne stanice i femto korisnika. Rezultati prikazani na slici 13 su dati za različite kombinacije vrijednosti n i q .

Kao što se moglo i logično pretpostaviti, dobijeni i grafički prikazani rezultati pokazuju da su u oba scenarija gubici u prenosu signala utoliko manji ukoliko je manje rastojanje između bazne stanice i mobilnog korisnika. Takođe, pokazuje se da se pri većem broju prepreka na putu prostiranja signala (plafoni, unutrašnji zidovi) dobijaju veće vrijednosti gubitaka (slika 13).

Na osnovu dobijenih vrijednosti gubitaka u prenosu signala, u sledećem koraku se može determinisati SINR za posmatrane mrežne scenarije, koristeći analitičke relacije (5) i (6). Pri tome, relacija (5) služi za izračunavanje SINR za primljeni signal od strane makro korisnika, dok relacija (6) služi za izračunavanje SINR primljenog signala od strane femto korisnika.

U svrhu ilustracije primjene navedenih relacija, za utvrđivanje SINR vrijednosti uzet je jedan makro korisnik za prvi scenario (korisnik broj 2) i jedan femto korisnik za drugi scenario (korisnik broj 8). Oba korisnika su izabrana po principu da su relativno blizu opslužujuće bazne stanice, pa se očekuju najbolji rezultati kada je kvalitet servisa u pitanju. Na taj način se stvaraju uslovi za upoređivanje kvaliteta prijema koji postižu makro korisnik i femto korisnik u najoptimalnijim uslovima.

Izabrani makro korisnik broj 2 u prvom scenariju je udaljen od makro bazne stanice 42.31m, a femto korisnik broj 8 je udaljen od opslužujuće femto bazne stanice 59.9m, pri čemu u oba slučaja ne postoje prepreke na putu prostiranja signala. Uvrštavajući u relacije (5) i (6) parametre iz Tabele II i odgovarajuće vrijednosti gubitaka u prenosu signala, dobijaju se približno iste vrijednosti SINR-a u oba scenarija, na bazi čega se može aproksimirati prijemni SINR za makro i femto korisnika na vrijednost $\text{SINR} = \log(5 \cdot 10^{-6}) / 1.5 = 8.128 = 9.10\text{dB}$ za korisnika broj 2 u prvom scenariju i korisnika broj 8 u drugom, *two-tier* scenariju.

Nakon dobijenih vrijednosti SINR-a, koristeći relacije (7) - (9) može se izračunati vrijednost kapaciteta makro i femto baznih stanica, odnosno protok u *downlink* smjeru koji one obezbjeđuju. Opet se uzimaju u razmatranje isti makro korisnik iz prvog scenarija (korisnik broj 2) i isti femto korisnik iz drugog scenarija (korisnik broj 8). Za poznate vrijednosti N_{spu} , N_{rb} , N_{m} i N_{f} date u Tabeli II dobija se sljedeće: $C_{\text{m,k}} = 25837$, $T_{\text{M}} = 7.2\text{Mbps}$ za makro korisnika broj 2 u prvom scenariju i $T_{\text{F}} = 72\text{Mbps}$ za femto korisnika broj 8 u drugom scenariju.

Dakle, proračuni za *downlink* protok makro i femto baznih stanica kod *two-tier* scenarija pokazuju mnogo bolje rezultate u odnosu na konvencionalni makro scenario. Kao što je pokazano primjerom korisnika 2 u prvom scenariju i korisnika 8 u drugom scenariju, vrijednost *downlink* protoka koju obezbjeđuje femto bazna stanica 9 dostiže 72Mbps u *two-tier* scenariju, što je deset puta više od vrijednosti protoka koju obezbjeđuje makro bazna stanica u makro scenariju, iako je čak makro

korisnik 17.9m bliži opslužujućoj makro baznoj stanici od korisnika koga opslužuje femto bazna stanica.

Izvedeni proračuni pokazuju koji faktori imaju uticaj na gubitke pri prenosu signala i na koji način se uvođenjem femto baznih stanica značajno poboljšava kapacitet i protok u sistemu. Tim se dokazuju značajna unapređenja koja se dobijaju implementacijom femto baznih stanica u konvencionalno makro okruženje, kad su mrežne performanse u pitanju. Njihova primjena ustvari omogućava ograničene modifikacije postojeće makro arhitekture i ostvarivanje velikih pomaka kada je kvalitet servisa u pitanju, uz relativno mala ulaganja.

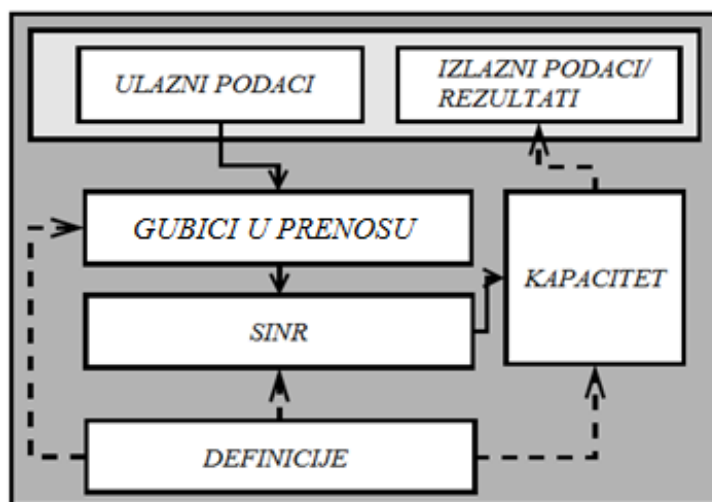
4.2. Simulacioni proračuni

Za provjeru validnosti prethodno datih numeričkih rezultata korišćen je LTE-A simulator [16]. Riječ je o *open source* programu pisanom u Matlabu pomoću koga se mogu kreirati različita mrežna okruženja. Prilikom planiranja mobilnog celularnog *two-tier* mrežnog okruženja, i pored mnogih prednosti femtoćelija, treba imati na umu da neusklađeno postavljanje femto baznih stanica otvara nova pitanja koja zahtijevaju duboku i temeljnu analizu, pa simulator pomaže pri jednostavnijem kreiranju najoptimalnijeg rješenja. Pitanja o kojima treba voditi računa su: broj korisnika koji makro i femto bazna stanica može da opsluži, njihov raspored, interferencija, nivoi snage zračenja. Simulatorom se kreiraju specifična okruženja, provjeravaju i računaju osnovne performanse mreže koje smo u prethodno numerički dobili: gubici u prenosu, SINR, kapacitet i protok u različitim tačkama mrežnog okruženja.

Glavni princip dizajna korišćenog simulatora je njegova modularnost. Biraju se ulazni podaci: pozicija femto baznih stanica, pozicija opslužujućih makro i femto korisnika, dimenziraju se zgrade, put između zgrada, modulaciona šema. Na slici 14. je dat algoritam toka proračuna.

Simulator je razdvojen na više jedinica, zaduženih za izvršavanje konkretne funkcije ili seta međusobno zavisnih funkcija. Jedinice se posmatraju kao moduli koji mogu biti grupisani u odvojenim slojevima. Takva arhitektura doprinosi većoj jednostavnosti i skalabilnosti jer omogućava modifikacije

pojedinih modula ili proširenje simulacione strukture. Sam simulacioni algoritam se može podijeliti na dva sloja. Niži sloj služi kao matematički model koji se koristi u simulaciji i podrazumjeva proračune gubitaka u prenosu, SINR-a, dobitka kanala i maksimalne vrijednosti protoka, uzimajući u obzir ulazne i sistemski definisane parametre. Viši sloj se koristi kao grafički interfejs koji služi za ulazne i izlazne podatke. Na ovom sloju nema proračuna direktno vezanih za numeričke jednačine, već se tu definišu parametri topologije: pozicije zgrada, pozicije femto baznih stanica, makro i femto korisnika, pri čemu je u topologiji pozicija makro bazne stanice inicijalno postavljena u centru šestougla. Implementirani simulacioni alat kao bazu koristi sljedeće elemente (module): modul za ulazne podatke, modul gubitaka prenosa, SINR estimacioni modul, modul za proračune kapaciteta, modul za izlazne podatke.



Slika 14. Dijagram arhitekture LTE-A simulatora

Modul za ulazne podatke služi za komunikaciju korisnika sa sistemom preko grafičkog korisničkog interfejsa. Kako bi se realizovali potrebni proračuni, simulatoru je potrebno dati ulazne podatke: broj femto baznih stanica, broj makro korisnika, broj femto korisnika, propusni opseg i tip modulacije, tačne koordinate zgrada. Takođe, u cilju generisanja mape, treba zadati broj zgrada po x i y osi, kao i širinu prostora između zgrada. Na osnovu koordinata, računa se rastojanje između mobilnog terminala i antene opslužujuće makro ili femto bazne stanice. Ovi podaci su dovoljni za proračun gubitaka u prenosu.

Modul za estimaciju gubitaka obuhvata matematičke modele iz prethodnog poglavlja uključujući: makro korisnika u *outdoor* sredini pod uticajem interferencije između opslužujuće

outdoor makro bazne stanice i susjednih femto baznih stanica, makro korisnika u *indoor* okruženju pod uticajem interferencije između opslužujuće *outdoor* makro bazne stanice i susjednih femto baznih stanica, femto korisnika u *outdoor* okruženju pod uticajem interferencije između opslužujuće *outdoor* femto bazne stanice, susjednih femto baznih stanica i makro bazne stanice, femto korisnika u *indoor* okruženju pod uticajem interferencije između opslužujuće *indoor* femto bazne stanice, susjednih femto baznih stanica i makro bazne stanice.

SINR estimacioni modul obuhvata utvrđivanje dobitka kanala i SINR matematički model. Ovdje modul za estimaciju gubitaka u prenosu služi kao polazište za računanje dobitka kanala.

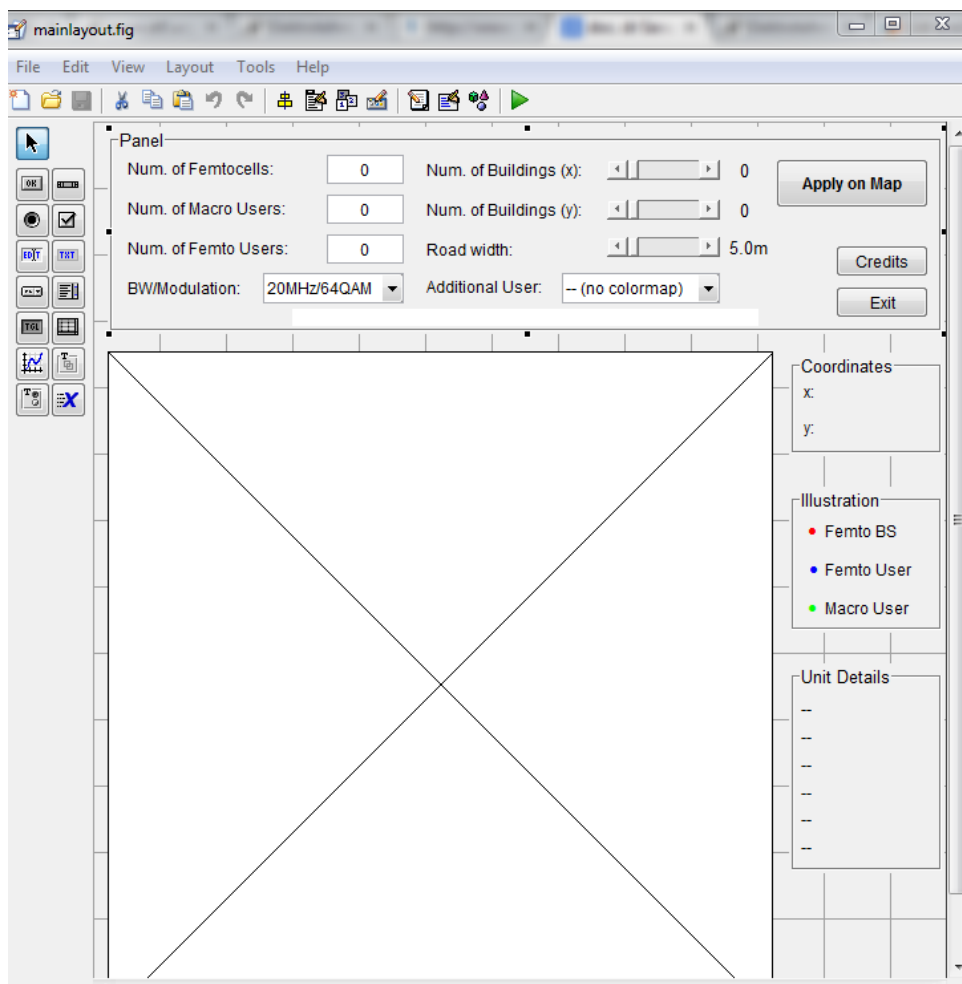
Modul za proračune kapaciteta, na osnovu prethodnih proračuna i uzimajući u obzir matematičke formule (7) i (8), daje rezultate za kapacitet u posmatranom konvencionalnom i *two-tier* sistemu.

Korisnički izlazni modul predstavlja rezultate koji se prikazuju u prozoru sa preciznim zadatim pozicijama i vrijednostima rastojanja korisnika od opslužujuće BS, gubitaka u prenosu, SINR-a, kapaciteta i protoka koji obezbjeđuje makro odnosno femto bazna stanica [12], [13], [14].

Prvi korak u kreiranju grafičkog interfejsa predstavlja postavljanje kontrolnih elemenata: *select*, *push button*, *slider*, *radio button*, *check box*, *edit text*, *static text*, *pop-up menu*, *listbox*, *toggle button*, *table*, *axes*, *panel*, *button group*, *activeX control*. Startno se postave njihove *default*-ne vrijednosti (slika 15).

U fajlu *mainlayout.m* se potom kreiraju kontrole. Kontrole služe za unošenje broja femto baznih stanica, femto korisnika, makro korisnika, broja zgrada po x i y osi, širine prostora između zgrada, propusnog opsega, vrste modulacije, dodatnih korisnika. « *Apply on map* » poziva funkciju *drawMap* ili *drawColormap* koja omogućava biranje i postavljanje femto baznih stanica:

```
function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)
if ~(strcmp(get(hObject, 'String'), 'Run Simulation'))
    drawMap(handles);
else
    drawColormap(handles);
end
```



Slika 15. Inicijalni prozor

Ako je string tastera « *Run simulation* » poziva se funkcija *drawMap*, ako nije poziva se funkcija *drawColormap*. Za slučaj razmatran u ovom radu na tasteru piše « *Apply on Map* », pa se poziva funkcija *drawMap.m*. Ona potom poziva jos par funkcija: *numberPlot*, *setRedLabel*, *setCurrentColor*. Sve one zajedno postavljaju koordinate, zgrade, femto bazne stanice, makro korisnike, femto korisnike. U *mainlayout.m* je definisan *motion event button* zadužen za kontrolu pomjeranja pokazivača. Kad god se pomjera pokazivač poziva se funkcija *setCurrentCoordinates*:

```
function figure1_WindowButtonMotionFcn(hObject, eventdata, handles)
axis equal;
setCurrentCoordinates(handles);
```

Funkcija *setCurrentCoordinates* je data kodom:


```

function setCurrentCoordinates(handles)
[x, y] = gpos(get(gcf, 'CurrentAxes'));
[x_real, y_real] = realCoordinates([x, y]);
x_coord = sprintf('x: %.2f', x_real);
y_coord = sprintf('y: %.2f', y_real);
set(handles.text17, 'String', x_coord);
set(handles.text18, 'String', y_coord);

```

Funkcije *x_coord* i *y_coord* ispisuju trenutne koordinate u toku pomjeranja pokazivača. Zatim se pozivaju funkcije *closestDepl* i *setObjDetails*:

```

[deplID, type] = closestDepl(x, y, handles);
setObjDetails(deplID, type, handles);

```

Funkcija *closestDepl* određuje da li je pokazivačem pozicionirana neka femto bazna stanica, makro bazna stanica ili femto korisnik. Ako nije ništa odabrano tada je *deplID=0* i *type=0*. Pri tome se za femto korisnike uzima *type=1*, za makro korisnike *type=2*, a za femto bazne stanice *type=3*. *deplID* je pozicija odabrane femto bazne stanice ili korisnika. Kada se odredi *deplID* i tip, poziva se funkcija *setObjDetails* koja računa: *capacity*, *SINR*, *G*, *PL*, *numOfWalls*, *dist*, *isIndoor*.

Broj femto korisnika se određuje pomoću funkcije *numOfFemtousers*. U zavisnosti od *mode_selection*-a mogu se imati različite vrijednosti broja resursnih blokova, kao i bita po simbolu:

```

numOfFemtousers = histc(coordVectors.att_cell, cellID);
if (get(handles.popupmenu7, 'Value') == cellID + 2)
    numOfFemtousers = numOfFemtousers + 1;
end
if mode_selection <= 3
    resBlocks = 100;
elseif mode_selection <= 6
    resBlocks = 75;
elseif mode_selection <= 9

```

```

    resBlocks = 50;
elseif mode_selection <= 12
    resBlocks = 25;
elseif mode_selection <= 15
    resBlocks = 15;
else
    resBlocks = 6;
end

if mod(mode_selection, 3) == 0
    bitsPerSymbol = 2;
elseif mod(mode_selection, 3) == 1
    bitsPerSymbol = 4;
else
    bitsPerSymbol = 6;
end

```

Zatim se može definisati broj podnosilaca po korisniku:

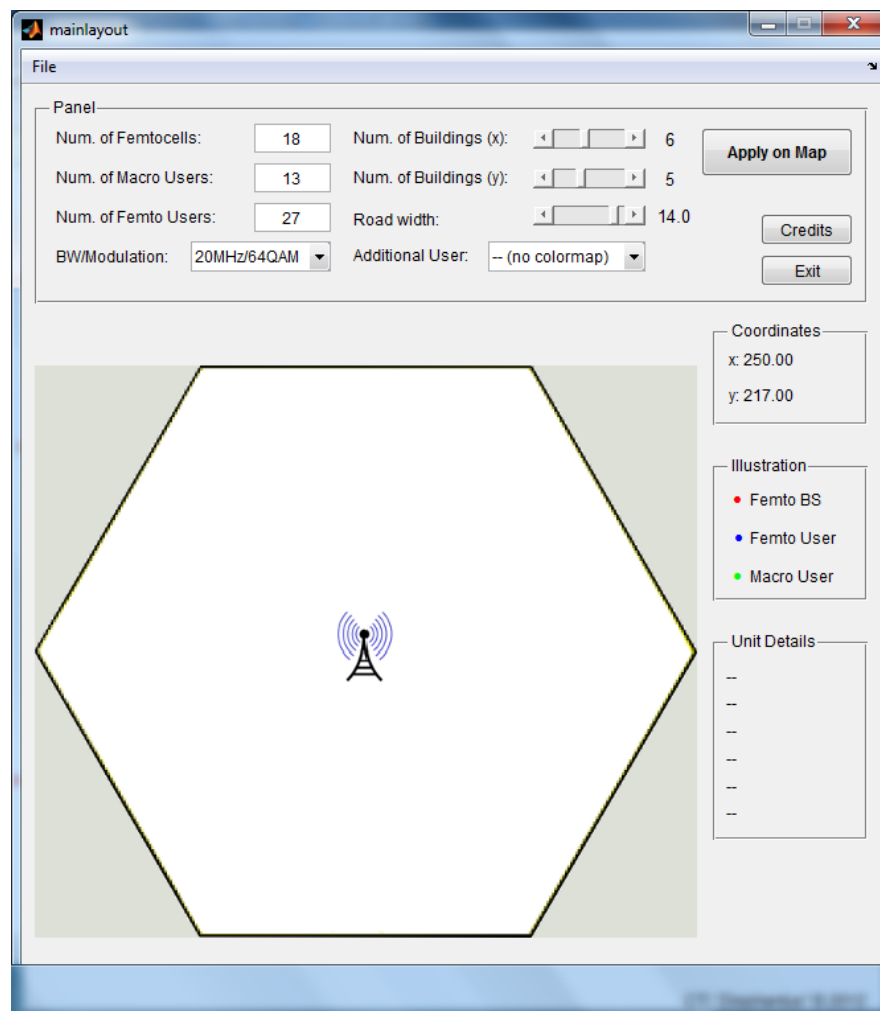
```

subcarriersPerUser = subcarriersPerResBlock * resBlocks / numOfFemtoUsers;
[SINR, G, PL, numOfWalls, dist, isIndoor] = SINRfemto(x, y, cellID, handles);
C = subcarriersPerUser * bitsPerSymbol * spacing_Df * log2(1 + alpha * SINR);

```

što kasnije omogućava da se dođe do vrijednosti protoka koji obezbjeđuju makro i femto BS.

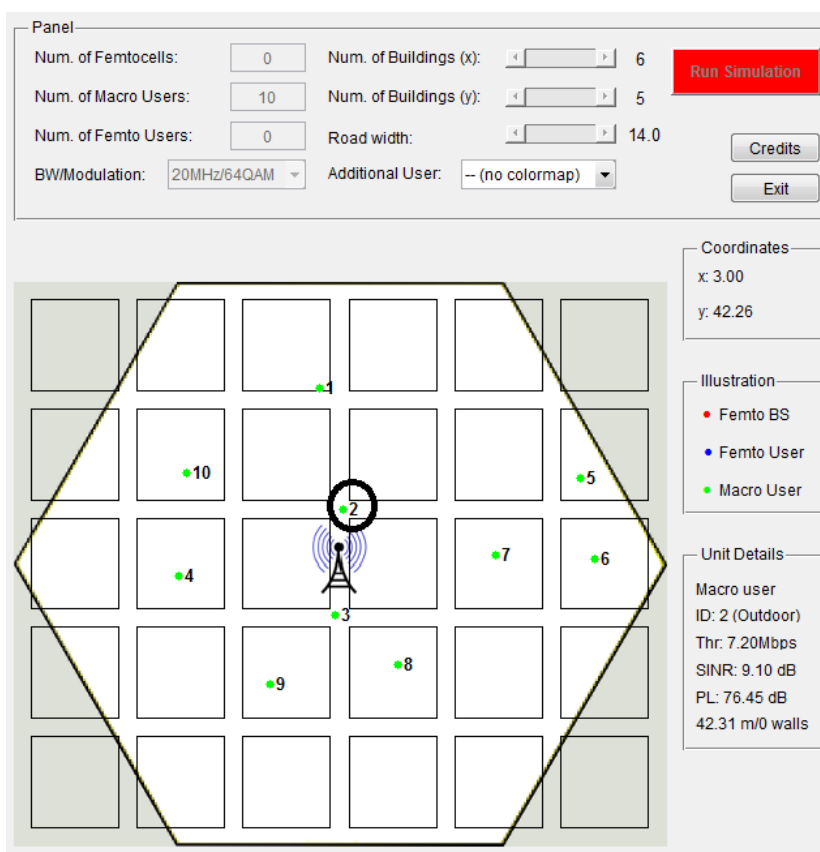
Simulacioni *input* prozor je dat na slici 16. Korisnik simulatora zadaje broj femto baznih stanica u jednom urbanom okruženju, broj makro korisnika, broj femto korisnika, broj zgrada po horizontali i vertikalni, širinu prostora između zgrada, opseg korištenih frekvencija na osnovu sadašnjih LTE-A standarda (1.4, 3, 5, 10, 15 ili 20 MHz), vrstu modulacije, pozicije femto BS-ova, femto i makro korisnika. Pozicija makro bazne stanice se *default*-no uzima da je u centru teritorije pokrivanja (šestougla).



Slika 16. *Input* prozor

Nakon zadavanja svih pozicija, simulator prikazuje udaljenosti između femto korisnika (ili makro korisnika) i njegove opslužujuće bazne stanice. Femto bazne stanice su označene crvenim krugovima, femto korisnici plavim, a makro korisnici zelenim tačkama. Potom se mogu isčitati vrijednosti gubitaka u prenosu signala za svaku pojedinačnu tačku mreže.

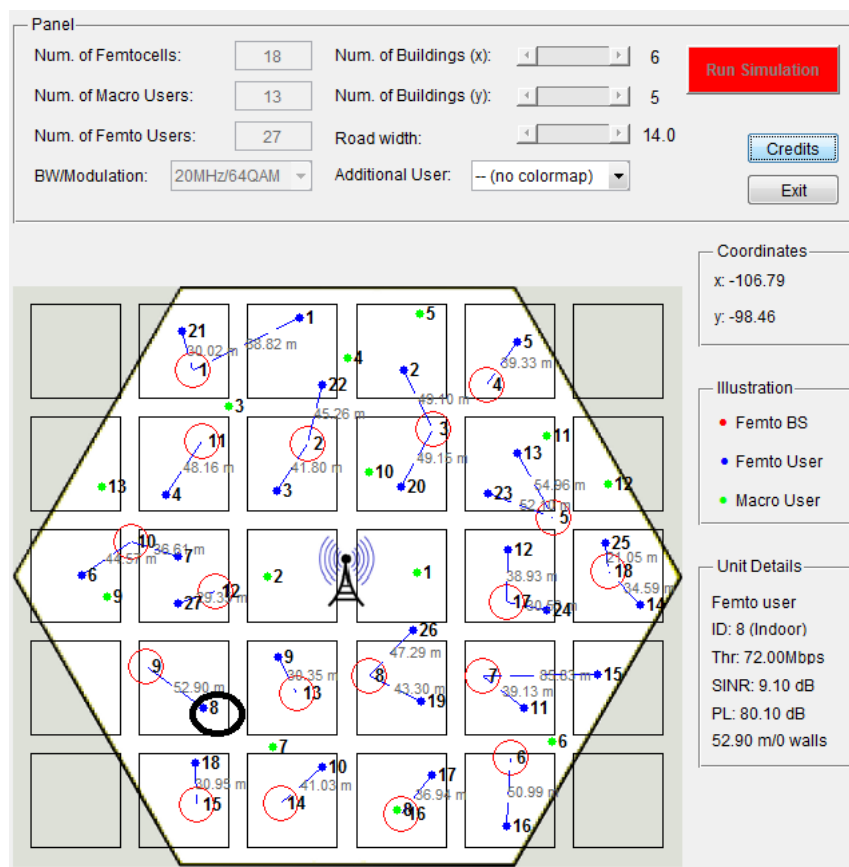
LTE-A simulator omogućava jednostavno rukovanje i setovanje mrežne topologije, u cilju ispitivanja mogućnosti dobijanja maksimalnog teorijskog protoka uz različite interferirajuće uslove. Simulacioni rezultati pokazuju ponašanje femto i makro baznih stanica i korisnika u različitim uslovima. Korisnik simulatora sam kreira urbano područje i definiše raspored zgrada i širinu ulica. Kada kreira okruženje i doda posljednjeg korisnika, mogu se na svakoj baznoj stanici ili mobilnoj jedinici očitati parametri simulacije: protok, SINR, gubici u prenosu, udaljenost mobilnog korisnika od bazne stanice.



Slika 17. Simulacioni rezultati za makro okruženje

Opisanim simulatorom se mogu kreirati sva pojedinačna okruženja razmatrana u prethodnom poglavlju u kome su analizirane numeričke vrijednosti gubitaka u prenosu signala, SINR, kapaciteta i protoka. Prvi scenario predstavlja makro okruženje sa jednom makro baznom stanicom i deset makro korisnika (slika 17), a drugo okruženje predstavlja *two-tier* scenario sa jednom makro baznom stanicom, trinaest makro korisnika, osamnaest femto baznih stanica i dvadeset sedam femto korisnika (slika 18).

Koristeći LTE-A simulator, dobijeni numerički rezultati su u potpunosti verifikovani. Tako, recimo da se opet posmatra makro korisnik broj 2 u makro scenariju i korisnik broj 8 u *two-tier* scenariju, kao što je bio slučaj u 4.1. Za zadate vrijednosti udaljenosti od opslužujuće bazne stanice za makro korisnika 2 u prvom scenariju (42.31m) i femto korisnika 8 u drugom scenariju (52.9m) gubici u prenosu signala koje očitava simulator iznose 76.45 i 80.1 dB, respektivno.



Slika 18. Simulacioni rezultati za *two-tier* okruženje

Kada je SINR u pitanju simulator setuje prag na $\text{SINR}_{\text{thr}} = \log(5 \cdot 10^{-6}) / 1.5 = 8.128 = 9.10 \text{ dB}$, što znači da u slučaju dobijanja većih vrijednosti, SINR je limitiran na ovu vrijednost (aproksimacija koja je uvedena u prethodnom poglavlju). Zatim, kao što se može vidjeti sa slika, simulator daje *downlink* protok femto bazne stanice 9 koja opslužuje korisnika 8 u modifikovanom makro-femto okruženju koji ima do 10 puta veće vrijednosti (72Mbps) u odnosu na protok makro bazne stanice u konvencionalnom makro okruženju (7.2Mbps), što se opet poklapa sa rezultatima dobijenim numeričkim putem i potvrđuje validnost razmatranog rješenja za poboljšanja u telekomunikacionoj mreži, zasnovana na implementaciji femto baznih stanica u konvencionalne makro mreže.

5. Metrike energetske efikasnosti

Prethodna razmatranja su nedvosmisleno pokazala da se modifikacijom tradicionalne arhitekture bežičnih celularnih mobilnih mreža postižu poboljšanja sa aspekta mrežnih performansi koja se mogu smatrati relevantnim ne samo kad je u pitanju kvalitet ostvarenog servisa, već i ukupna energetska efikasnost ovih telekomunikacionih mreža. Kako bi se na pravi način valorizovao stepen energetske efikasnosti potrebno je uvesti metrike koje mjere i definišu energetske efikasnosti, tj. stepen „zelenog“ u telekomunikacionim mrežama. U tom cilju i postoji više vrsta energetskih metrika koje daju važne informacije u cilju direktnog poređenja i procjene potrošnje pojedinačnih komponenti i cjelokupne mreže. Takođe pomažu i u identifikovanju dugoročnih rješenja za smanjivanje potrošnje električne energije. Generalno se može uočiti da na polju „zelenih“ telekomunikacija raste broj različitih metrika energetske efikasnosti, pa organizacije za standardizaciju, kao što su ETSI (European Technical Standards Institute) i ATIS (Alliance for Telecommunications Industry Solutions), konstantno rade na njihovom definisanju i modifikacijama.

U ovom radu će se definisati najčešće korišćene metrike energetske efikasnosti i primijeniti na razmatrane makro i makro-femto scenarije. Sveobuhvatnim proračunima, grafičkim prikazima, razmatranjem i poređenjem rezultata različitih metrika u scenarijima analiziranim u radu, ideja egzaktnog utvrđivanja energetske efikasnosti dobija svoj praktični smisao, predstavljen u narednim poglavljima.

5.1. Klasifikacija metrika energetske efikasnosti

Polazeći od činjenice da su metrike dobar pokazatelj energetske efikasnosti, njihovo razumijevanje je neophodno za omogućavanje boljeg uvida u postignuti nivo energetske efikasnosti u bežičnim mobilnim mrežama. Generalno, metrike energetske efikasnosti u telekomunikacionim sistemima se mogu klasifikovati u tri glavne kategorije:

- metrike nivoa efikasnosti komponenti,

- metrike nivoa opreme i
- metrike nivoa mreže.

Metrike nivoa komponenti se vezuju za specifične komponente opreme: pojačavač, antena, procesor, sistem za napajanje, sistemi podrške, opcione komponente kao na primjer za kontrolu temperature. Tako je recimo, energetska efikasnost antene vezana za ulaznu antensku snagu i snagu koju antena emituje. Antena visoke energetske efikasnosti skoro svu ulaznu snagu predaje dalje, dok antena niske energetske efikasnosti većinu snage apsorbira i troši kroz unutrašnje gubitke. Efikasnost antene se može prikazati kao odnos emitovane i uložene snage [17]:

$$\eta_{\text{ant}} = P_{\text{emitovano}} / P_{\text{uloženo}} \quad (12)$$

Drugi parametar koji takodje može poslužiti kao mjera efikasnosti je dobitak antene, koji pokazuje odnos snage koja se predaje u nekom smjeru u *peak*-u emitovanja u odnosu na izotropnu antenu koja vrši emitovanje u svim smjerovima podjednako. Dobitak antene G se računa kao [17]:

$$G = \frac{4\pi \cdot I_E}{P_{\text{uloženo}}} \quad (13)$$

gdje je I_E intenzitet emitovanja antene, a $P_{\text{uloženo}}$ uložena snaga neophodna za rad antene. Takođe, kao dobar pokazatelj metrike efikasnosti nivoa komponenti, može se razmatrati i efikasnost pojačavača snage kao odnos efektivne izlazne i ulazne snage pojačavača [17]:

$$\eta_{\text{PA}} = P_{\text{izlazna}} / P_{\text{ulazna}} \quad (14)$$

Metrike nivoa opreme računaju performanse individualne opreme. Metrike kao što su TEER (Telecommunications Energy Efficiency Ratio) and TEEER (Telecommunication Equipment Energy Efficiency Rating) se odnose na potrošnju energije opreme pri različitom intenzitetu saobraćaja. TEEER se definiše kao [18]:

$$\text{TEEER} = -\log \frac{P_{\text{ukupno}}}{\text{protok}} \quad (15)$$

gdje P_{ukupno} predstavlja ukupnu snagu opreme, a protok se odnosi na ostvareni protok u sistemu. Kada su metrike nivoa opreme u pitanju, takođe treba imati na umu da snaga koju oprema razvija u mnogome zavisi od opterećenja u sistemu, tj. od intenziteta saobraćaja. Ukoliko se računa snaga opreme pri različitom intenzitetu saobraćaja u analizi se uzimaju intervali sa velikim, srednjim i

niskim opterećenjem. Trajanje tih intervala je t_v, t_s, t_N , a snaga koja se razvija za vrijeme navedenih intervala data je sa P_v, P_s, P_N , respektivno. Pa je prosječna snaga P_{opreme} jednaka [19]:

$$P_{opreme} = \frac{P_v t_v + P_s t_s + P_N t_N}{t_v + t_s + t_N} \quad (16)$$

Metrike nivoa mreže polaze od performansi mreže, s tim što se istovremeno uključuju i osobine vezane za kapacitet i mrežno pokrivanje. Ove metrike su najzahtjevnije za definisanje, jer moraju uzeti u obzir puno aspekata mreže: pokrivanje, protok, intenzitet saobraćaja, gustinu i raspored baznih stanica i korisnika. Tako se u ruralnim područjima uzima u obzir odnos površine pokrivanja sajta u km^2 ($A_{pokrivanja}$) i snage koju sajt razvija (P_{sajta}) [20]:

$$PI_{ruralna} = A_{pokrivanja} / P_{sajta} \quad (17)$$

U urbanim područjima je mnogo više korisnika po sajtu, pa se za indikaciju energetske efikasnosti umjesto teritorije pokrivanja, uzima odnos broja korisnika N i ukupne snage koju sajt razvija (P_{sajta}) [21]:

$$PI_{urbana} = N / P_{sajta} \quad (18)$$

Pored navedenih, može se definisati još jedna korisna metrika koja uključuje ključne mrežne performanse. Riječ je o KPIEE (Performance Indicator of Energy Efficiency). Ona ima značajnu uloga s aspekta analize i testiranja funkcionisanja mreže od strane operatora, a definiše se kao:

$$KPIEE = \frac{KPI}{P_{ukupno}} \quad (19)$$

gdje P_{ukupno} predstavlja ukupnu snagu potrebnu za rad mreže, a KPI može biti bilo koja ključna mrežna performansa koju operatori mjere (i prate) i smatraju važnom za indikaciju kvaliteta mreže. Neke od takvih performansi su: procenat uspješno uspostavljanih poziva, procenat neregularno raskinutih poziva, procenat uspješno uspostavljenih CS (*circuit switched*) konekcija, procenat uspješno uspostavljenih PS (*packet switched*) konekcija, količina ostvarenog CS saobraćaja, količina ostvarenog PS saobraćaja, procenat uspješno ostvarenih *handover*-a, procenat uspješnosti registracije na mobilnu mrežu, procenat uspješnih aktivacija *data* servisa i mnoge druge. Stoga se, sa aspekta ovog indikatora, energetska efikasnost telekomunikacionih mreža može kvantitativno opisivati polazeći od različitih parametara s tim da treba voditi računa o njihovom pravilnom izboru i dimenzionisanju.

Tabela III: Metrike energetske efikasnosti

METRIKA	NIVO	JEDINICA	KRATAK OPIS
PUE (Power Usage Efficiency)	Nivo postrojenja	Odnos (≥ 1)	Odnos ukupne snage postrojenja i snage opreme
DCE (Data Center Efficiency)	Nivo postrojenja	Procenat	Recipročna vrijednost od PUE
TEER (Telecommunications Energy Efficiency Ratio)	Nivo opreme	Gbps/W	Odnos protoka u sistemu i snage opreme
TEEER (Telecommunications Equipment Energy Efficiency Ratio)	Nivo opreme	$-\log\left(\frac{\text{Gbps}}{W}\right)$	$-\log\left(\frac{P_{\text{ukupno}}}{\text{protok}}\right)$, gdje je P_{ukupno} dato relacijom (16)
ECR (Energy Consumption Rating)	Nivo opreme	W/Gbps	Odnos uložene snage i protoka u sistemu
ECR-W (ECR-Weighted)	Nivo opreme	W/Gbps	Računa se kao ECR, sa razlikom što se energetska potrošnja računa po formuli: $P = 0.35P_{\text{puni}} + 0.4P_{\text{pola}} + 0.25P_{\text{idle}}$ gdje su P_{puni} , P_{pola} i P_{idle} snage u punom, polovičnom i <i>idle</i> režimu rada bazne stanice (<i>idle</i> režim podrazumijeva uključene samo kontrolne funkcije bazne stanice)
ECR-VL (ECR-Variable Load)	Nivo opreme	W/Gbps	Prosječan nivo energije u referentnoj mreži, opisuje se matricama iskorišćenja
ECR-EX(ECR-Extended idle)	Nivo opreme	W/Gbps	Prosječan nivo energije u referentnoj mreži sa mogućnošću dodatnih energetskih ušteda
PI_{rural} (Performance Indicator in rural areas)	Nivo mreže	km^2 / W	Odnos ukupne teritorije pokrivanja i snage utrošene na sajtu
PI_{urban} (Performance Indicator in urban areas)	Nivo mreže	Broj korisnika/W	Odnos broja korisnika i snage sajta
KPIEE (Key Performance Indicator Energy Efficiency)	Nivo mreže	Broj uspješnih KPI parametara/W	Odnos broja uspješnih ključnih mrežnih indikatora i snage utrošene na sajtu

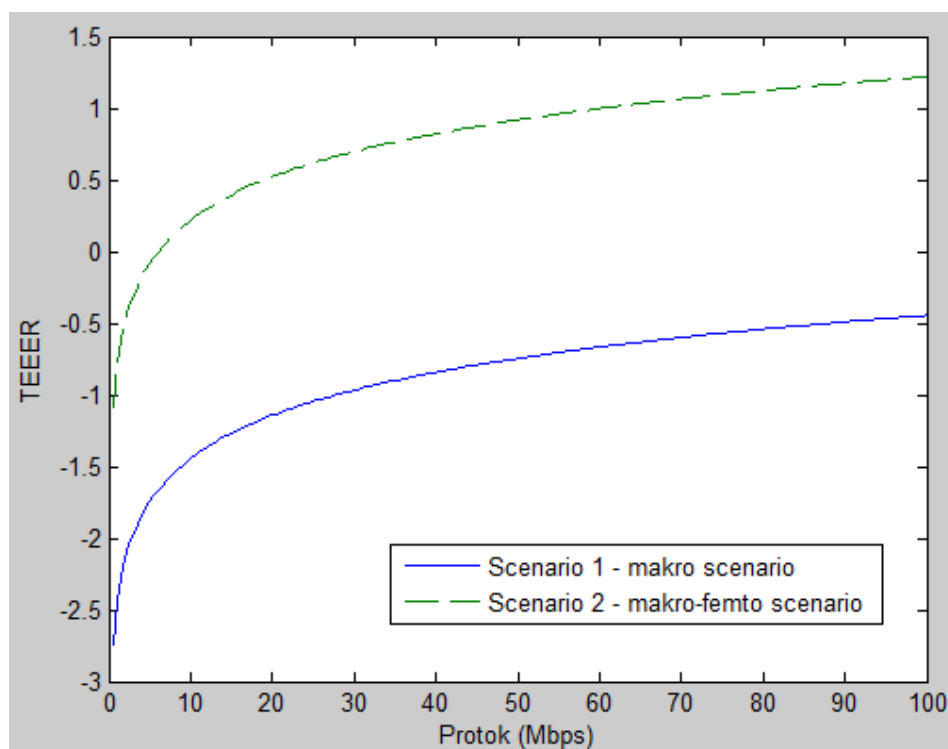
U prethodnom tekstu su opisane neke od metrika čijim utvrđivanjem se mogu dobiti relevantni podaci o postignutom nivou energetske efikasnosti bežičnih celularnih mobilnih telekomunikacionih mreža. Nešto šira lista metrika koje se takođe mogu koristiti je prikazana i opisana u Tabeli III.

S obzirom da je cilj istraživanja opisanih u ovom radu utvrđivanje uticaja predložene modifikacije arhitekture celularnih bežičnih mreža na njihovu energetska efikasnost, dalja analiza u ovoj glavi je posvećena determinisanju odgovarajućih metrika na osnovu koji se taj uticaj može adekvatno kvantifikovati. U tu svrhu, fokus je na sledećim „zelenim“ metrikama: TEEER, PI_{urban} i KPIEE, koje mogu dati dovoljno elemenata za izvođenje potrebnih ocjena i zaključaka.

5.2. TEEER (Telecommunications Equipment Energy Efficiency Ratio)

U radu se prvo analizira metrika nivoa efikasnosti postrojenja TEEER, koristeći jednačine (14) i (15) i rezultate dobijene simulatorom. Polazeći od činjenice da se kao dobar pokazatelj nekog „zelenog” rješenja uzima odnos ostvarenog protoka i uložene snage, u cilju dobijanja odgovarajućih proračuna neophodno je krenuti od vrijednosti snage koju razvija tipična makro/femto bazna stanica i protoka koji se postiže u sistemu. U analizama smo koristili sljedeće vrijednosti za tipičnu makro baznu stanicu: $P_{full}=500W$, $P_{half}=250W$, $P_{sleep}=15W$, dok su za tipičnu femto baznu stanicu uzete vrijednosti: $P_{full}=10.2W$, $P_{half}=6W$, $P_{sleep}=0.3W$ [22]. Za prethodno opisani makro scenario 1 i protok od 7.2Mbps, TEEER iznosi -1.5879. Za iste vrijednosti protoka, za makro-femto scenario 2 sa slike 18 TEEER iznosi 0.0759. Ukoliko se teoretski pretpostavi da je moguće u analiziranom makro scenariju dobiti protoke od 72Mbps, TEEER bi iznosio -0.5879, dok u makro-femto slučaju, za simulacioni rezultat od 72Mbps, TEEER iznosi 1.0759. Vrijednosti TEEER-a za posmatrana dva scenarija variraju od par mjernih jedinica ispod nule kod makro scenarija 1 do par mjernih jedinica iznad nule kod makro-femto scenarija 2, pri čemu što su TEEER vrijednosti veće, energetska efikasnost sistema je veća.

U cilju ilustracije prednosti femtoćelija kad je u pitanju energetska efikasnost prikazan je TEEER dijagram (slika 19), za širok dijapazon protoka tj. brzina prenosa, od 0 do 100Mbps.



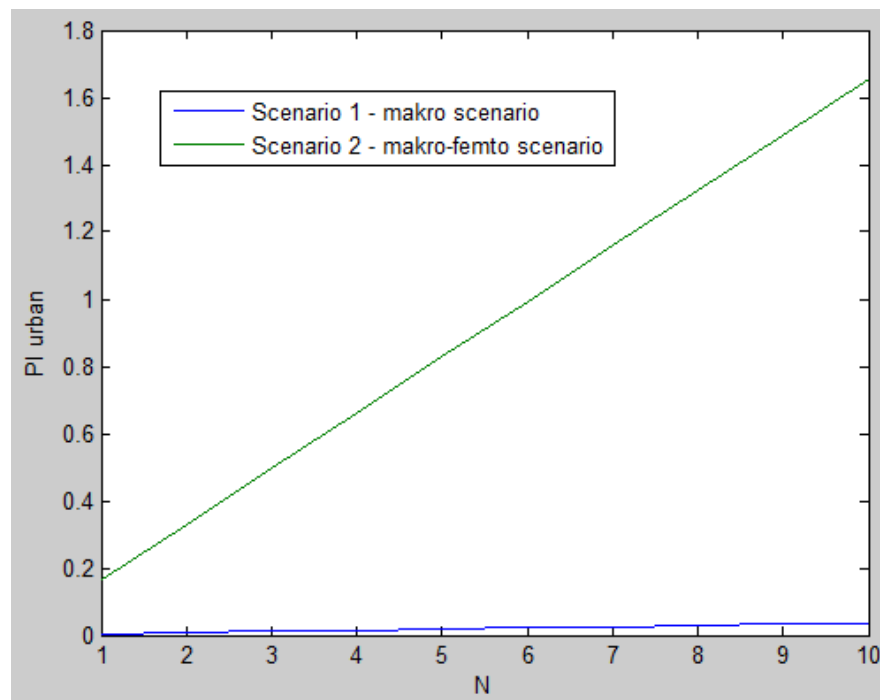
Slika 19. TEEER za analizirane scenarije

Plavom punom linijom je označena kriva TEEER-a za makro scenario 1, a isprekidanom zelenom kriva TEEER-a za makro-femto scenario 2. Očigledno je da su, za bilo koju vrijednost protoka u sistemu, TEEER vrijednosti veće za makro-femto scenario, pri čemu ta razlika iznosi oko 2 mjerne jedinice.

Na osnovu navedenih TEEER vrijednosti za posmatrane scenarije, može se izvesti zaključak da implementacija femto baznih stanica u postojeća makro okruženja ima pozitivne efekte na energetska efikasnost bežičnih celularnih mreža i štaviše, što su veće brzine prenosa u sistemu energetska efikasnost sistema, koju opisuje TEEER metrika, je veća. Ovo je jako važna činjenica, imajuću u vidu da današnje bežične celularne mreže teže što većim protocima, a ujedno se postavljaju zahtjevi za što manjom energetsom potrošnjom i što većom energetsom efikasnošću.

5.3. PI urban (Performance indicator for urban areas)

Druga metrika energetske efikasnosti koja se analizira u ovom radu je PI_{urban} , data jednačinom (17), koja predstavlja dobar pokazatelj energetske efikasnosti u urbanim sredinama. Za broj korisnika N se uzimaju vrijednosti između 1 i 10 (slika 20), imajući na umu da jedna femto bazna stanica može opslužiti maksimalno deset korisnika istovremeno. Vrijednosti za ukupnu snagu u makro i makro-femto scenariju se računaju koristeći jednačinu (16).



Slika 20. PI_{urban} za analizirane scenarije

Na slici 20 plava kriva se odnosi na makro, a zelena na makro-femto scenario. Kako raste broj korisnika u prvom scenariju PI_{urban} jako malo raste (vrijednost ne prelazi 0.1), dok je u makro-femto scenariju porast značajan (od 0.18 do 1.68). S obzirom da PI_{urban} predstavlja indikatora energetske efikasnosti u urbanim sredinama, što je njegova vrijednost veća, veća je i energetska efikasnost zadate urbane regije za posmatrane scenarije 1 i 2. Stoga se izvodi zaključak da je za makro-femto scenario 1, sa porastom korisnika N , porast vrijednosti PI_{urban} značajno veći nego za makro scenario 2, što opet ukazuje na veću energetska efikasnost scenarija sa femto baznim stanicama implemetiranim u makro

okruženju. Zato je pri planiranju urbanog mrežnog celularnog okruženja važno imati ovaj parametar na umu, kao i njegove manifestacije u makro i makro-femto urbanoj sredini.

5.4. KPIEE (Key Performance Indicator Energy Efficiency)

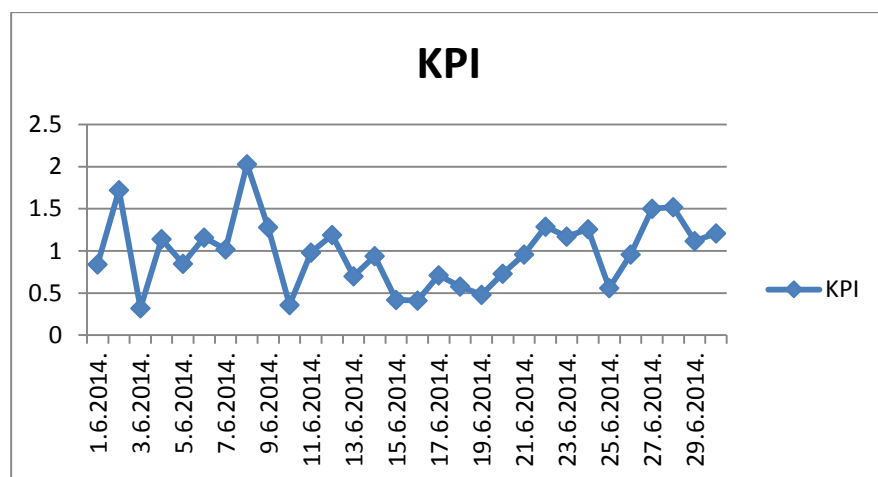
Treća metrika koja se analizira je KPIEE, data jednačinom (19). Za KPIEE proračune neophodno je prvo definisati snagu makro i femto bazne stanice i odgovarajući KPI parametar. U ovoj analizi se za proračune snaga baznih stanica koriste iste vrijednosti kao pri računanju TEEER-a i PI_{urban} .

Zatim, potrebno je naći vezu između ključnih performansi sistema (KPI) koji opisuju kvalitet bežične celularne mreže i snage koju razvija makro i femto bazna stanica. Za svrhe istraživanja predstavljenog u ovom radu, ključna performansa mreže koja se uzima u razmatranje data je sljedećom relacijom:

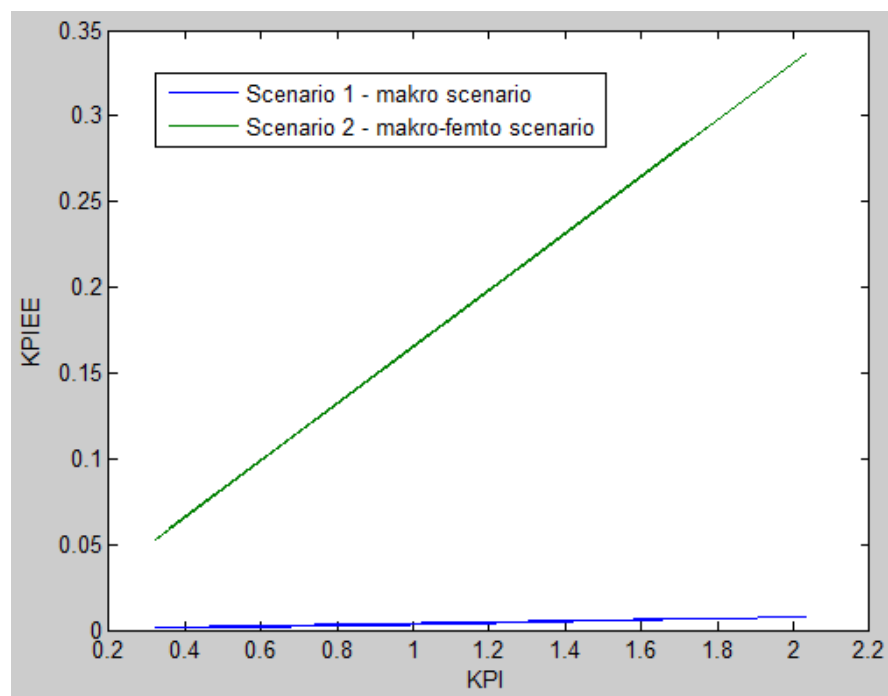
$$KPI = \frac{\text{Attempted Activation} - \text{Completed Activation}}{\text{Attempted Activation}} \quad (8)$$

gdje Attempted Activation predstavlja broj zahtjeva za kreiranje bežične mobilne sesije, a Completed Activation predstavlja broj kreiranih i završenih (zatvorenih) bežičnih mobilnih sesija. U ovdje predstavljenim analizama korišćene su KPI vrijednosti ostvarene u mreži operatora „Crnogorski Telekom“. Na primjer, za period od prvog do tridesetog juna 2014.godine identifikovane su vrijednosti prikazane na slici 21.

Na osnovu ovih vrijednosti su dobijene krive koje opisuju KPIEE za makro scenario (plava boja) i makro-femto scenario (zelena boja), slika 22. Slika dokazuje da kako KPI raste, KPIEE takođe raste, opet u korist makro-femto scenarija u odnosu na makro scenario. Ovo predstavlja još jednu potvrdu prednosti implementacije femto baznih stanica u tradicionalne makro bežične celularne mreže.



Slika 21. KPI vrijednosti u mobilnoj mreži „Crnogorskog Telekoma“ za mjesec jun 2014.



Slika 22. KPIEE za analizirane scenarije

Analizirane metrike, TEEER, PI_{urban} i KPIEE, su samo neki primjeri metrika energetske efikasnosti koji pokazuju značajna poboljšanja u slučajevima modifikacije konvencionalne makro mrežne arhitekture uvođenjem femto baznih stanica.

6. Zaključak

S ciljem da se isprate novi trendovi razvoja mobilnih mreža koji nameću konstantne zahtjeve za velikim brzinama prenosa, boljim kvalitetom servisa, smanjenjem energetske potrošnje, u ovom radu se kreiraju i razmatraju različiti mrežni scenariji: konvencionalni makro scenario i modifikovani, heterogeni scenario koji nastaje redefinisanjem konvencionalnih makro mreža i dodavanjem femto baznih stanica. Osnovni razlog predmetne modifikacije se svodi na analiziranje mogućnosti smanjenja potrošnje električne energije u tako implementiranim heterogenim mobilnim celularnim telekomunikacionim mrežama. Nova heterogena arhitektura nosi naziv *two-tier* „zelena“ mreža i podrazumjeva prisustvo makro i femto baznih stanica. Makro stanice obezbjeđuju velike površine pokrivanja, dok femto bazne stanice obezbjeđuju bolje mrežne performanse.

Kada se posmatraju konvencionalne makro mreže, i pored činjenice da opterećenje mobilne mreže u toku vremena veoma varira, one se konfigurišu dosta statično. U cilju analize energetski efikasnijeg funkcionisanja uzimaju se u obzir dinamičke fluktuacije saobraćaja. Konvencionalni režim sa makro baznim stanicama podrazumijeva konstantan, aktivan rad bazne stanice, nezavisno od intenziteta saobraćaja, dok dinamički režim u novom *two-tier* okruženju podrazumjeva prilagođavanje rada baznih stanica intenzitetu saobraćaja. Da bi se stekao uvid u prednosti dinamičkog u odnosu na konstantni režim rada bazne stanice u ovom radu se daje uvid u uštedu energije u slučaju implementacije femto baznih stanica, koje mogu da registruju kada u okolini nema aktivnih korisnika i pređu iz aktivnog režima rada u *half* ili *sleep* stanje, pri čemu se ostvaruju uštede energije do dva puta.

Dalje, kada je u pitanju analiza mrežnih performansi, uzimaju se u razmatranje: gubici u prenosu signala, odnos između signala i šuma sa interferencijom, kapacitet i protok. Iz numeričkih formulacija za gubitke u prenosu signala, SINR i kapacitet računaju se protoci koji se ostvaruju u konvencionalnom makro i modifikovanom makro-femto okruženju. Pokazano je da se za makro-femto okruženje, u poređenju sa makro okruženjem, dobijaju daleko bolji rezultati za protok sistema pri istim vrijednostima gubitaka u prenosu signala, SINR i u istoj urbanoj topologiji.

Kako bi se verifikovali svi prikazani numerički rezultati, uz pomoć LTE-A simulatora setuje se topologija i analiziraju se vrijednosti za oba scenarija. Dobijeni simulacioni rezultati u potpunosti su potvrdili polazne teorijske pretpostavke i numeričke rezultate, pa stoga opravdavaju težnju za novom, modificovanom arhitekturom sa uključivanjem femto baznih stanica u konvencionalna makro okruženja.

U radu su potom uvedene specifične metrike energetske efikasnosti, koje su poslužile i za utvrđivanje odnosa protoka i snage, broja korisnika i snage, odnosa ključnih indikatora kvaliteta mrežne i potrebne snage da bi se oni ostvarili. Na osnovu proračuna koji se dobijaju na osnovu metrika TEEER, PI_{urban} i KPIEE, pokazano je da daleko bolje rezultate u energetskej efikasnosti i mrežnim performansama daje makro-femto okruženje. Zaključuje se, da pored boljeg kvaliteta mreže, implementacijom femto baznih stanica u tradicionalna mrežna okruženja, štedimo značajne energetske resurse. Metrikama i grafičkim prikazima metrika energetske efikasnosti u ovom radu su ilustrovani precizni pokazatelji efekata uvođenja femto baznih stanica.

Sa aspekta operatora, značajan obim saobraćaja bi bio pomjeren sa nivoa makro mreža na femto ćelije, pri čemu se može smanjiti i broj makro baznih stanica i opreme za *backhaul* transmisiju makro baznih stanica ka *core*-u mreže što značajno umanjuje ne samo potrošnju energije, već i ukupne troškove. Sa aspekta korisnika, povoljno je što femto bazne stanice mogu biti postavljene gdje želimo i obezbijediti dovoljno radio *indoor* pokrivanja mobilnim terminalima uz manju potrošnju energije.

Svakako da sve metode, metrike, protokole i relacije koji su predstavljali predmet analiza u ovom radu treba s pažnjom primijenjivati u svakom konkretnom okruženju, kako bi prednosti i koristi u mobilnoj mreži Crnogorskog Telekoma zaista bili postignuti, smanjili se troškovi i očuvala životna sredina, a uz to bio postignut i odgovarajući kvalitet servisa. Rezultati izloženi u ovom radu predstavljaju dobru osnovu za dalja istraživanja na polju energetske efikasnosti i povećanja protoka celularnih mobilnih bežičnih telekomunikacionih mreža, a mogu poslužiti istraživačima i operatorima za analize u sličnim telekomunikacionim scenarijima.

Literatura

- [1] T. Chen, H. Kim, and Y. Yang, „Energy efficiency metrics for green wireless communications”, 2010 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), pp.1-6, October 2010.
- [2] L. Suarez, L. Nuaymi and J.M. Bonnin, „An overview and classification of research approaches in green wireless networks”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, April 2012.
- [3] A. He, A. Amanna, T. Tsou, X. Chen, D. Datla, J. Gaeddert, T. R. Newman, S.M. Shajedul Hasan, H. I. Volos, J. H. Reed and T. Bose, „Green Communications: A Call for Power Efficient Wireless Systems”, Journal of communications, vol. 6, no. 4, July 2011
- [4] „Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013–2018“, www.cisco.com, February 2014.
- [5] „Ericsson mobility report, November 2013“, www.ericsson.com
- [6] <http://www.smallcellforum.org/>
- [7] „Ericsson mobility report, June 2014“, www.ericsson.com
- [8] „Ericsson mobility report, November 2014“, www.ericsson.com
- [9] M. A. Marsan, L. Chiaraviglio, D. Ciullo, and M. Meo, „Optimal energy savings in cellular access networks“, in Proc. of IEEE ICC'2009, 2009.
- [10] A. Aligrudić, M. Pejanović-Djurišić, „Energetska efikasnost u mobilnim radio mrežama”, Informacione tehnologije IT'13, Žabljak, Februar 2013.

- [11] Y.W. Chung, „Performance Modeling of Energy-Efficient Femtocell Base Stations“, International Conference on Information and Computer Networks (ICICN) IPCSIT vol. 27 IACSIT Press, Singapore, 2012.
- [12] 3GPP TR 36.814 V9.0.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9). Technical report, 3rd Generation Partnership Project, 2010.
- [13] 3GPP TR 36.922 V9.1.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); TDD Home eNode B (HeNB) Radio Frequency (RF) requirements analysis (Release 9). Technical report, 3rd Generation Partnership Project, 2010.
- [14] P. Lee, T. Lee, J. Jeong and J. Shin, „Interference management in lte femtocell systems using fractional frequency reuse“, Advanced Communication Technology (ICACT), 12th International Conference on, volume 2, pages 1047-1051, 2010.
- [15] C.Bouras, V.Kokkinos, A.Papazois and K.Kontodimas, „A simulation framework for LTE-A systems with femtocell overlays“, PM2HW2N, Paphos, Cyprus, October 2012.
- [16] G. Piro, L.A. Grieco, G. Boggia, F. Capozzi and P. Camarda, „Simulating LTE Cellular Systems: an Open Source Framework“, IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 60, no. 2, Februar 2011.
- [17] C.Z.Hasan, H.Boostanimehr and V.K.Bhargava, „Green Cellular Networks: A Survey, Some Research Issues and Challenges“, IEEE communications surveys & tutorials, vol. 13, no. 4, fourth quarter 2011.
- [18] A.Aligrudić, M.Pejanović-Djurišić, „Energy efficiency and throughput improvements in two-tier networks with femtocells“, TELFOR 2013, Beograd, November 2013.
- [19] P. Lee, T. Lee, J. Jeong and J. Shin, „Interference management in LTE femtocell systems using fractional frequency reuse. In Advanced Communication Technology (ICACT)“, The 12th International Conference, vol. 2, 1047 -1051, Februar 2010.

[20] <http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/>

[21] G. Koutitas, P. Demestichas, „A Review of Energy Efficiency in Telecommunication Networks“, Telfor Journal, vol. 2, no. 1, 2010.

[22] A. Aligrudić, M. Pejanović-Djurišić, „Energy efficiency metrics for heterogeneous wireless cellular networks“, WTS 2014, Washington D.C., April 2014.