

OBRAZLOŽENJE PRIJEDLOGA TEME DOKTORSKE DISERTACIJE

1. PRIJEDLOG NAZIVA:

Bosanski:

**"DOPRINOS OPTIMIZACIJI PERFORMANSI BEŽIČNIH MREŽA
U PROSTORU ODREĐENOM RAZLIČITIM ODNOSIMA
SPEKTRALNE I ENERGETSKE EFIKASNOSTI"**

Engleski:

**"CONTRIBUTION TO OPTIMISATION OF THE PERFORMANCE
WIRELESS NETWORKS BASED ON SPECTRAL AND ENERGY EFFICIENCY TRADEOFFS"**

2. PREDMET ISTRAŽIVANJA

Količina energija koja se troši u široko rasprostranjenim radio pristupnim mrežama se povećava iz dana u dan i predstavlja više od 3% današnje svjetske potrošnje energije, [1]. U literaturi se posebna pažnja posvećuje ovoj problematici, a što je dovelo do toga da se razvija koncept „zelenih“ tehnologija, sa ciljem da se istraže rješenja koja treba da dovedu mreže nove generacije u stanje visoke energetske efikasnosti.

Međutim, visok nivo mrežne propusnosti podrazumijeva veliku potrošnju energije, što je nekad nemoguće obezbijediti ili zbog ograničenja mreže napajanja, topološke organizacije i dimenzija mreže, ili zbog terminalnih uređaja koji su ograničenih energetske kapaciteta.

Jedan od načina na koji se problem energetske efikasnosti može tretirati je optimizacija performansi radio pristupnih mreža sa aspekta spektralne i energetske efikasnosti. Spektralna efikasnost se koristi kao mjera performansi bežičnih komunikacijskih sistema. Sistemi koji su bazirani na spektralnoj efikasnosti su izvedeni tako da se maksimizira spektralna efikasnost u granicama vršne ili srednje snage.

Predmet razmatranja je, u osnovi, energetska efikasnost (EE, η_{EE}) kao broj prenesenih informacijskih bita po jedinici energije [b/J]¹ sa aspekta teorije informacija za različite scenarije. Poznato je da se za radio kanal sa aditivnim gausovim bijelim šumom (AWGN), za datu izračenu snagu P i širinu opsega B za dati sistem, kapacitet kanala može izraziti na sljedeći način:

Pošto

$$C = \max(R) = B \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0 B} \right)$$

predstavlja broj informacijskih bita prenesenih u jedinici vremena, gdje je N_0 spektralna gustina snage šuma [3, poglavlje 5], a B širina opsega. Uvažavajući relaciju $R \leq C$, dobije se da je energetska efikasnost (EE) [4]

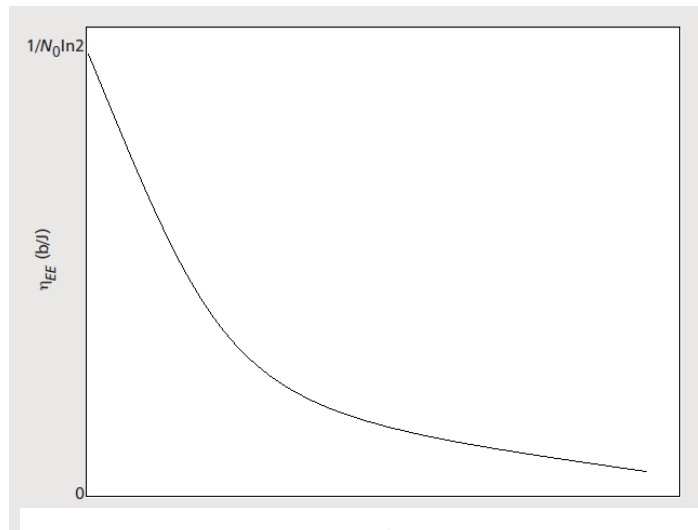
$$\eta_{EE} = \frac{C}{P} = \frac{2R}{N_0(2^{2R} - 1)} / P \quad (1)$$

Iz jednačine (1) očigledno je da se η_{EE} smanjuje monotono sa R, uz $\max(\eta_{EE}) = 1/(N_0 \ln 2)$, ako $R \rightarrow 0$, i $\min(\eta_{EE}) = 0$, ako $R \rightarrow \infty$.

¹ J=kg·m²/s²=N·m=W·s

Rezultat u jednačini (1) se postiže uz pretpostavku slučaja beskonačne dužine informacijskog bloka i beskonačnog broja stepeni slobode (dimenzionalnost simbola u signalnom prostoru). Međutim, sistem se ponaša drugačije za slučaj konačnih vrijednosti iz jednačine (1). Pokazano je u [4] da bešumna povratna sprega (engl. noiseless feedback) vodi do mnogo bolje EE u ovom slučaju, a da raspoloživost bešumne povratne sprege ne poboljšava EE u slučaju beskonačnih informacijskih blokova i beskonačnog broja uzoraka po simbolu. ("slučaj beskonačnosti").

Primjer koji najbolje pokazuje kakvi odnosi vladaju u prostoru snaga i energija na elementarnom modelu sistema, a određeni su odnosima spektralne i



Slika 1. Odnos energetske efikasnosti i bitske brzine

energetske efikasnosti sa ciljem da se dobiju propusnosti koje mogu da osiguraju zahtjeve naprednih vremenski koleriranih servisa i aplikacija (prenos slike, videa, govora) vidljivi su iz sljedećih primjera:

Prvi slučaj: Pretpostavimo model koji radi u prostoru niske spektralne efikasnosti, $\eta_{SE}=0.1\text{b/s/Hz}$, te da je potrebno povećati propusnost (brzinu prenosa informacija u kanalu – engl. throughput) 8 puta, što dovodi do potrebe da se snaga signala na ulazu u prijemnik (prijemna snaga) treba povećati ~ 10 puta. Ovaj primjer, u biti, predstavlja specijalni slučaj „linearnog“ odnosa između promjena brzine prenosa informacija promjena prijemne snage, a što nije primjenjivo na vremenski korelisane aplikacije koje traže značajno veće brzine prenosa.

Drugi slučaj: Pretpostavimo model koji radi u prostoru viših vrijednosti spektralne efikasnosti reda 2b/s/Hz , te je potrebno povećati propusnost samo 4 puta, pokazuje se da prijemnu snagu treba povećati ~ 85 puta.

Treći slučaj: Pretpostavimo da je spektralna efikasnost ista kao u prethodnom slučaju i ako propusnost treba povećati 10 puta, potrebno je obezbijediti ~ 300.000 puta veću prijemnu snagu.

Vidimo da se povećanjem propusnosti u mreži uz povećano iskorištenje resursa dolazi do značajnog povećanja energetske potrošnje. Zbog toga je došlo do razvoja različitih naprednih mrežnih izvedbi u smislu poboljšanja prostorne spektralne efikasnosti (spektralna efikasnost normirana na prostorne dimenzije, engl. *Area Spectral Efficiency (ASE)*), kao što su:

- optimizacija broja baznih stanica ćelijskih mreža,
- odgovarajuće postavljanje relejnih tačaka,
- brojne šeme za dodjeljivanje resursa i obezbjeđenje kvaliteta servisa, (quality of service (QoS)) za sve krajnje korisnike,
- zadovoljenje raznolikosti i višekorisničkih potreba,
- različite komunikacijske tehnike kao što su:
 - OFDMA (orthogonal frequency-division multiple access), značajan spektralno efikasan tehnološki pomaka prenosa sa jednostrukih na višestruke nosioce,
 - MIMO tehnike (multiple-input multiple-output), pogodnost da prostornim diverzitetom višestrukih antena povećamo i kapacitet sistema i spektralnu efikasnost.

U dosadašnjim istraživanjima razmatrana su pojedinačna rješenja sa različitih aspekata i to spektralna efikasnost sa aspekta informacijske teorije [4], problem optimizacije topologije i dimenzija radio mreža [5], zatim višeslojna optimizacija energetske efikasnosti [7]. U oblasti upravljanja resursima u cilju optimizacije energetske efikasnosti predstavljeni su rezultati za određena scenarija i predloženi mehanizmi optimizacije [8]. Rješavanjem problema: utjecaj interferencije u mrežama [9], efikasnijim

detekcionim tehnikama [10], naprednim komunikacijskim tehnologijama sa efikasnijim modulacionim tehnikama [15], različita rješenja uz upotrebu diverziteti tehnika [16], značajno su poboljšani odnosi između spektralne i energetske efikasnosti u energetske optimiziranim sistemima. Vršena su istraživanja i odnosa operativnih troškova normiranih na cijene elemenata mreže, uključujući i nivo potrošnje energije [14]. Sva ova i druga istraživanja su rezultirala karakterizacijom problema i povezivanjem različitih rezultata u jedan jedinstven okvir koji se sastoji od 4 kategorije međusobnih kompromisnih zavisnosti, [2]:

- kompromis DE-EE: (Deployment efficiency (DE)–energy efficiency (EE) trade-off): optimizirati troškove eksploatacije, mrežene propusnosti (throughput-a) i potrošnje energije u cijeloj mreži;
- kompromis SE-EE (Spectrum efficiency (SE)–EE trade-off): optimizirati za datu i raspoloživu širinu opsega moguću (optimalnu) brzinu prenosa i potrošnju energije sistema;
- kompromis BW-PW (Bandwidth (BW)–power (PW) trade-off): za datu ciljnu informacijsku brzinu optimizirati iskorištenje frekventnog opsega (spektra) i električne snage potrebne za prenos signala;
- kompromis DL-PW (Delay (DL)–PW trade-off): optimizirati srednje kašnjenje servisa skraja-na-kraj mreže i srednju snagu utrošenu za prenos.

U ovim istraživanjima je tretiran aspekt koji podrazumijeva analizu energetske efikasne bežične komunikacije iz informacijsko-teorijske i tehnološko orijentirane perspektive. Što se tiče informacijsko-teorijskog aspekta većina poznate literature o energetske efikasnosti se uglavnom fokusira na elementarnom modelu, odnosno jednočelijskoj vezi od tačke do tačke (engl. PTP Point-to-Point). Ovakvim scenarijem uticaj praktičnih pitanja o energetske efikasnosti nije u potpunosti iskorišten.

Dakle, istraživanje o energetske efikasnosti treba biti prošireno na slučajeve višestrukih korisnika/višestrukih ćelija kao i na razmatranje praktičnih pitanja kao što su prenos signala povezane sa potrošnjom električne energije, što je od velikog značaja za praktični dizajn sistema. Moguće je ostvariti veću energetske efikasnost kroz energetske efikasan dizajn, tako da je potrebno uzeti u razmatranje sve napredne tehnika kao što su:

- višekorisnička pristupna tehnologija višestrukih nosilaca OFDMA (engl. Orthogonal Frequency-Division Multiple Access), koja je našla primjenu u mobilnim mrežama 4. generacije, poznatim kao LTE (engl. Long Term Evolution),
- sistemi sa višestrukim antenskim elementima i korištenje prostornog, vremenskog diverziteta, kao što su SIMO, MISO i MIMO sistemi (od Multiple/Single Input-Multiple/Single Output),
- tehnike optimalnog raspoređivanja releja i višestrukim korištenjem relejnih tačaka (fiksne i mobilne).

Kako je većina istraživanja, koji tretiraju navedenu problematiku, realizirana samo na scenariju elementarnih mrežnih modela, uz primjenu efikasne telekomunikacijskih tehnika, potrebno je uložiti dosta napora kako bi se ostvario doprinos koji je predviđen realizacijom ovog naučno-istraživačkog projekta, odnosno rješavanjem naznačenih problema na scenariju realnih mreža..

3. MOTIVACIJA ZA ISTRAŽIVAČKI RAD I OPRAVDANOST ISTRAŽIVANJA

Od bežičnih mreža nove generacije se očekuje da omoguće Internet pristup velike brzine, bilo gdje i bilo kada. Popularnost pametnih telefona (engl. *smartphones*) je bez sumnje ubrzala proces i kreirala nove zahtjeve za saobraćajem, kao što su mobilni video i raznovrsne aplikacije (igrice, livescores...). Eksponencijalni porast prenosa podataka i zahtjeva za sveprisutnim pristupom je izazvao značajnu ekspanziju mrežnih infrastruktura i brzu povećanje potreba za energijom. Za mobilne operatore postaje neophodno da omoguće očuvanje održivog porasta kapaciteta i da u isto vrijeme ograniče potrošnju energije.

Povećanje potrošnje energije u bežičnim mrežama direktno dovodi do povećanja emisije zagađivačkih materija (engl. *Greenhouse gas emission*), koja predstavlja veliku prijetnju očuvanju životne sredine i

održivom razvoju društva. Evropska Unija (EU) je širom svijeta djelovala kao lider u uštedi energije sa ciljem reduciranja emisije štetnih materija za 20%. Kineska vlada je također obećala da će reducirati energiju po jedinici bruto domaćeg proizvoda (engl. *Gross Domestic Product*, GDP) za 20% i velikih zagađenja za 10% do 2020. godine. Pritisak društvene odgovornosti služi kao još jedna jaka pokretačka snaga za bežične operatore da dramatično reduciraju potrošnju energije i emisiju ugljen dioksida. Poduzimaju se razne akcije širom svijeta. Naprimjer, Vodafone Group je objavila da će reducirati svoje emisije ugljen dioksida (CO₂) za 50% od svoje osnovne linije od 1.23 miliona tona (2006-2007) do 2020. godine². Realizaciju ove ideje Vodafone vidi u iznalaženju rješenja za poboljšanje energetske efikasnosti kao jedno od najvažnijih područja koja zahtijevaju inovacije za bežične standarde poslije LTE-a (engl. *Long Term Evolution*). [5]

Kao što je istaknuto u [1], radio pristupni dio celularne mreže je glavni potrošač energije, koji za brojne mobilne operatore zauzima i više od 70% ukupne potrošnje energije³. Prema tome, povećavanjem energetske efikasnosti radio mreže u cjelini može predstavljati pristup koji značajno rješava probleme zagađenja, onosno ide u pravcu „zelene evolucije“. Zelena evolucija je inicijativa Evropske Unije za očuvanje okoline i održiv razvoj društva u kojoj treba da učestvuju kako kompanije, tako i pojedinci.

„Zeleni radio“ (GR-engl. *Green Radio*), istraživački pravac za evoluciju budućih bežičnih arhitektura i tehnika prema većoj energetske efikasnosti, je postao važan trend kako u akademskom tako i u industrijskom svijetu. Prije GR-a su postojali i drugi poduhvati posvećeni uštedi energije u bežičnim mrežama, kao što je dizajniranje ultra efikasnih pojačavača snage, reduciranje gubitka na talasovodima i RF putevima radio sistema i uvođenje pasivnog hlađenja. Međutim, ovi poduhvati su bili izolirani i stoga se nije mogla kreirati globalna vizija toga šta bi se dogodilo u petogodišnjem ili desetogodišnjem periodu uštede energije. S druge strane GR se fokusira na inovativna rješenja bazirana na „*top-down*“ arhitekturi i zajedničkom dizajnu na svim nivoima sistema i protokol stack-a, koja se ne mogu postići izoliranim poduhvatima.

Tražeći načine kako da se smanji velika potrošnja energije i njeno kontinuirano povećanje zbog zahtjeva za sve većim kapacitetima mreža mnogi projekti su pokrenuti i dali su rezultate (OPERANet, 2008.10~2010.10; Energy Aware Radio and Network Technologies (EARTH) 2010.1~2012.6, Green Radio 2009.1~2012.1; Green Touch 2010.1~2015.1), [2].

Upravo iz ovoga što je prethodno navedeno, kandidat želi pojedinačno i u istraživačkom timu doprinijeti konceptu „zelene evolucije“ i to kroz predviđanja kako postići optimalan odnos veličina koje su prethodno grupisane u 4 kategorije u cjelini, odnosno kako podesiti radnu tačku bežičnih sistema na krivoj odnosa veličina kako bi se izoptimizirali specifični sistemski zahtjevi.

Ova i slična problematika je trenutno u fokusu interesovanja kako industrije tako i akademske zajednice i dio je istraživanja koja će dovesti do potpune standardizacije 5-te generacije mobilnih komunikacija.

4. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVAČKA DOSTIGNUĆA U OBLASTI ENERGETSKE EFIKASNOSTI

Postojeći rezultati istraživanja su pokazali da relejni sistemi mogu značajno poboljšati energetske efikasnosti. Međutim, nekoliko važnih pitanja je još uvijek otvoreno [6].

- Relejni prenos koji uzima u obzir opterećenje: Dodatno vrijeme i energija se mogu koristiti za alokaciju resursa za vrijeme trajanja relejnog prenosa. Nije jasno poznato kako minimizirati ukupnu potrošnju energije uzimajući u obzir dodatno opterećenje.

² Informacije dostupne na <http://www.vodafone.com/start/media relations/news/group press releases/2007/01.html>

³ <http://www.huawei.com/green.do>.

- Energetski efikasni dvosmjerni relejni sistemi: Dvosmjerno prosljeđivanje je tehnika koja je u procvatu i koja pruža više mogućnosti za uštedu energije. Zanimljivo pitanje od interesa predstavlja kako dizajnirati energetski efikasan dvosmjerni relejni sistem.
- Relejni prenos u okruženju višestrukih ćelija: Većina postojećeg rada se fokusira na STS (engl. *Singlepoint-to-Singlepoint*) prenos; potrebno je dodatno istražiti kako alocirati resurse u MTS (engl. *Multipoint-to-Singlepoint*) ili MTM (engl. *Multipoint-to-Multipoint*) prenosu.

Predložene su razne energetski efikasne metode za različite slojeve bežičnih mreža. Za mrežno planiranje analiziran je uticaj veličine ćelija na energetsku efikasnost u celularnim mrežama [5]. Pokazalo se da se smanjivanjem veličine ćelije može povećati broj dostavljenih informacijskih bita po jedinici energije za datu gustoću korisnika i ukupnu snagu u servisnom području (engl. *Service Area*, SA). Ukoliko se uvede režim mirovanja (engl. *Sleep mode*), energetska efikasnost se može dalje poboljšati. Osim toga, raspoređivanje ćelija različitih veličina (npr. korištenje mikroćelija na rubu makroćelija) je također efikasan način za uštedu energije kao i za poboljšanje performansi za korisnike koji se nalaze na rubu ćelije. Za sloj kontrole pristupa mediju (engl. *Medium Access Control*, MAC) sloj, protokoli su dizajnirani kako bi se efikasno koristili resursi (npr. snaga, vremenski slotovi i frekvencijski opsezi) za reduciranje potrošnje energije. Za fizički sloj su ispitane različite transmisione tehnike i to sa aspekta energetske efikasnosti (EE) umjesto sa tradicionalnog aspekta spektralne efikasnosti (SE). Također su razvijeni i neki pristupi unakrsnih slojeva (engl. *Cross-layer*) i to u cilju ostvarenja većeg dobitka u odnosu na dizajn nezavisnih slojeva [7].

Iako je fokus ovog projekta na tehnikama korištenim na fizičkom i MAC sloju značajno je razmotriti i optimizacijske mehanizme energetske efikasnosti, unakrsno, po svim slojevima, u vremenskom, frekvencijskom i prostornom domenu što je razmatrano u [3], dok su četiri fundamentalna kompromisa (efikasnost-energetska efikasnost, spektralna efikasnost-energetska efikasnost, propusni opseg-snaga i kašnjenje-snaga) analizirani u [2]. Kako razviti specifične energetski efikasne tehnike se razmatraju u [6]. Prvo su objašnjene osnove energetski efikasnih komunikacija, uključujući informacijsko-teorijske granice i uticaj nekih praktičnih pitanja. Analizirane su tehnike višestrukog pristupa s obzirom na energetsku efikasnost [15], gdje je naglašen dizajn energetski efikasnog OFDMA sistema budući da je sveobuhvatno istraživanje o energetskoj efikasnosti u CDMA mrežama prezentovano u [8]. Zatim su razrađene neke napredne tehnike uključujući MIMO i relejni prenos [13,14]. Iako ove tehnike mogu značajno poboljšati spektralnu efikasnost one podrazumijevaju značajne troškove koji uključuju dodatnu konfiguraciju antena ili relejnih stanica i dodatnu potrošnju energije. Obrađen je i dizajn energetski efikasnih MIMO i relejnih sistema, respektivno [18]. Analiziran je i dizajn signalizacije s obzirom na energetsku efikasnost sa fokusom na alokaciju resursa između signalizacije i simbola podataka. [10-12]

Pored tokova podataka, signalizacijski simboli se naširoko koriste za olakšavanje prenosa podataka u bežičnim komunikacijskim sistemima. Reprezentativne su signalizacija za sinhronizaciju i estimaciju kanala. U početku, alokacija resursa za signalizacijske simbole je bila neovisna od alokacije resursa za podatkovne simbole [11]. Na primjer, broj i snaga training sekvenci za estimaciju kanala se određuju samo kada je potrebna precizna estimacija. Međutim, dizajn odvajanja signalizacijskih i podatkovnih simbola ne optimizira performanse sistema. Stoga je združena alokacija resursa između signalizacijskih i podatkovnih simbola veoma važna za energetski efikasni dizajn.

Asinhrona energetska efikasnost je analizirana u [12] i to za scenarije u kojima je trošak postizanja sinhronizacije značajan. Pokazano je da značajno smanjenje energetske efikasnosti u asinhronom slučaju, za razliku od sinhronog slučaja, u velikoj mjeri ovisi od mjere vremenske neizvjesnosti. Energetska efikasnost koja uzima u obzir training baziranu estimaciju kanala je analizirana u [13]. gdje su analizirane training bazirane šeme energetske efikasnosti, i to kada je svaki ulazni vektor kanala u svakom koherentnom bloku podložan vršnom ograničenju snage. Optimalna dodjela resursa u cilju maksimiziranja energetske efikasnosti se dobiva kroz numeričku analizu.

Općenito, istraživanje alokacije resursa između podatkovnih i signalizacijskih simbola je tek u početnoj fazi. Postoje mnoga otvorena pitanja kao što su: dodjela resursa između signalizacijskih i podatkovnih simbola u slučaju višestrukih korisnika; Optimiziranje izvedbi signalizacije uzimajući u obzir CSI (engl.

Channel State Information), što je tretirano u [16] Iako CSI na predajniku mogu pomoći značajnom poboljšanju kapaciteta sistema, dodatna potrošnja energije zbog opterećenja povratnim informacijama može usporiti povećanje energetske efikasnosti. zato je potrebno dodatno istražiti efekat mehanizama za dodjeljivanje resursa sa povratnim informacijama o CSI, što je ostalo kao otvoreno pitanje..

Poseban problem potrošene električne energije i izračene RF snage u slučaju i bazne stanice i terminalnih uređaja koji su najčešće baterijski napajani, razmatran je u [17], gdje je dat prijedlog šema za adaptaciju linka i dodjelu resursa koji optimiziraju ukupan broj prenesenih bita po jedinici energije, što omogućuje maksimalnu uštedu energije u mreži. Takođe su predstavljene i simulacijske potvrde za ove predložene šeme. U ovom radu su autori fokusirani na OFDMA kanale sa ravnim fedingom, dok ostaje otvoreno pitanje frekventno selektivnih kanala.

Adaptivni modeli koji se razmatraju u [19] omogućuju da se uštedi i do 50% energije i to metodom dinamičkog prelaska iz SISO u MIMO mod, što značajno održava željenu korisničku brzinu prenosa uz postizanje dobre energetske efikasnosti. Međutim ovdje su ostavljena otvorena pitanja iz jedne od 4 kategorije, tj. problem optimizacije kašnjenja i energetske efikasnosti uz očuvanje performansi sistema, tako da ovaj prijedlog nije pogodan za aplikacije u realnom vremenu.

Višeslojna analiza OFDM sistema sa aspekta odnosa između brzine prenosa, snage predajnika (odnosno potrebne snage signala na prijemu) i brzine bitske greške, predstavljena u [20] rezultirala je zaključcima o međusobnim zavisnostima koji vode ka tome da optimalan slučaj podrazumijeva povećane zahtjeve za povećanim računarskim (procesori, memorija) resursima i na strani predajnika (razmjena kontrolnih informacija, signalizacije) i na strani prijemnika (estimacija kanala). Istraživanja obavljena na slučaju tačka-tačka. U slučaju kompleksnijih realizacija tačka-višestruka tačka ovaj se problem dodatno komplikuje, te ostaje kao otvoreno pitanje i predmet daljeg istraživanja.

Autori tima iz prethodnog rada su se takođe bavili i optimizacijom energetske efikasnosti u smislu utjecaja interferencije, te predstavili u [21]. Razvili su šemu koja optimizira potrošnju energije u komunikacijskim sistemima ograničene interferencije bazirano na predloženom modelu iz [18]. Razmotrena je energetska efikasnost i u dijelu električnog napajanja i izračene snage (RF snaga) u zavisnosti od propusnosti. Na elementarnom modelu, od dva korisnika, primijećeno je da predložena optimizacijska šema poboljšava i spektralnu i energetska efikasnost zbog konzervativnog načina upravljanja snagom i principom smanjenog utjecaja ostalih ćelija u mreži. Međutim, takođe je uočeno da u prisustvu jake interferencije nije moguće primijeniti predloženi optimizacijski model.

3GPP takođe značajno razmatra rješenja za štednju energije za LTE koja moraju da garantuju neophodan pristup mreži, neovisno o vrsti napajanja električnom energijom, posebno na nivo korisničke opreme. U cilju postizanja ovog cilja zaključeno je da se dalja istraživanja trebaju kretati u pravcu iznalaženja rješenja koja pružaju mogućnost dinamičkog napajanje električnom energijom u zavisnosti od potreba za propusnošću u vremenu. Ovi zadaci se uglavnom rješavaju na MAC sloju u upravljačkim protokolima. Sa aspekta frekventnog domena potrebno je obezbijediti rješenja koja podrazumijevaju uži frekventni spektar za prenos u kanalu nego potrebnom širinom opsega za upravljačke mehanizme na višim slojevima. U vremenskom domenu potrebno je riješiti odnos između vremena dodjela resursa i mogućih podokvira za dinamičko upravljanje snagom i potrebne brzine prenosa. Rezultat ovog istraživanja je predstavljen u [22]. Kao rezultat ovih prijedloga čitav niz radova [23-25] vezanih za optimizaciju odnosa energetske efikasnosti, spektralne efikasnosti, pojava u kanalu kako u frekventnoj, tako i vremenskoj domeni, te mehanizmi, koji u višeslojnom pristupu rješavanju problema, doprinose poboljšanju performansi sistema. Svi ovi radovi su bazirani na elementarnom modelu.

Prvi od radova koji tretira komunikacijske veze višestrukih releja (multihop relays) [26], na bazi opet elementarnog modela, tj. para izvor-odredište. oristan rezultat ovog istraživanja je predloženi model ukupne potrošnje energije za datu brzinu prenosa. Dalja razrada ove strategije bi se sastojala u tome da se razmotre mnogo realnije situacije kao npr. prostorna ponovna upotreba spektra te kooperativne strategije (zahtijeva povećanje informacijske brzine) ili čak višestruki parovi izvor-odredište kao sistemski model za razmatranje. Nastavak ove strategije i realizacija otvorenih pitanja opisan je u radovima [27-31]. Rezultati

su iskoristivi u analizi koja podrazumijeva udruženu analizu međuzavisnih parametara iz 4 okvira karakterisanih u [2].

U [32] se razmatra pitanje energetske efikasnosti u mrežama kognitivnog radija, odnosno u mrežama u kojima se frekventni spektar može koristiti i od strane primarnog korisnika i sekundarnog, gdje osnovni princip osluškivanja spektra generiše povećanu energetske potrošnju. [33] obrađuje diskusiju o pitanjima vezanim za energetske efikasne pristup detekcije spektra uz navođenje postojećih rješenja. [33] predlaže nove algoritme. Što se tiče pitanja raspoređivanja sekundarnih mreža na makro osnovi, analizirane su prednosti i nedostaci dvije postojeće šeme i predloženo je rješenje koje predstavlja integraciju ove dvije postojeće šeme u cilju poboljšanja energetske efikasnosti cijele mreže [34-38]. Energetski efikasne nekooperativne kognitivne mreže (CRN) se razmatraju na tri nivoa [39-42]: algoritam za osluškivanje spektra (micro nivo), algoritam za dijeljenje radio spektra (meco nivo), te izgradnja energetske efikasne kognitivne radio mreže (macro nivo). Spektralna efikasnost, mehanizmi za osluškivanje i pristupne tehnološka rješenja su poznata i standardizovna. Ono što ovi radovi otvaraju kao područje budućeg istraživanja su pitanja i problemi koji se javljaju na mreži integralno i to uz korištenje kombinacije dvije poznate mrežne šeme u cilju obezbjeđenja sigurnog i pouzdanog CRN-a.

5. OSNOVNA HIPOTEZA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Na bazi relevantnih teorijskih postavki i doprinosa dosadašnjih istraživanja u ovoj oblasti, citiranih u ovoj prijavi, ustanovljena je četverostruka veza između potrošnje energije cjelokupnog bežičnog sistema/mreže i:

1. troškova eksploatacije i mrežne propusnosti;
2. moguće (optimalne) brzine prenosa za datu i raspoloživu širinu opsega;
3. spektralne efikasnosti, odnosno optimalnog iskorištenje frekventnog opsega (spektra) za ciljnu informacijsku brzinu;
4. srednjeg kašnjenja servisa skraja-na-kraj mreže

koja čini okvir od 4 lokalna optimizacijska modela. Osnovna hipoteza rada se sastoji u tvrdnji da će poboljšanje performansi radio pristupnih mreža biti postignuto dodatnim povećanjem energetske efikasnosti.

Osnovni cilj ovog naučno-istraživačkog projekta je da se, u skladu sa postavljenom hipotezom, predloži jedno rješenje za poboljšanje performansi pristupnih radio mrežnih sistema, kojim će se postići povećanje energetske efikasnosti rješavajući ovaj problem kao optimizacijski problem integrirajući rješenja i rezultate istraživanja iz oblasti koji tretiraju problematiku iz 4 lokalna optimizacijska modela.

U svrhu postizanja postavljenog cilja izvršiće se analiza međusobnih zavisnosti spektralne i energetske efikasnosti sa proširenim scenarijima koji će podrazumijevati:

- višekorisničke i višečelijske ambijente;
- koegzistenciju primarnih i sekundarnih korisnika radio spektra (kognitivni radio),
- opcijama uređaj-uređaj, mašina-mašina (Device-to-device, machine-to-machine).

6. PRIMIJENJENE NAUČNE METODE

U skladu sa najboljom praksom naučnoistraživačkog rada za postizanje ciljeva istraživanja, u ovom radu, će biti primijenjena kombinacija više naučnih metoda kojima se može obuhvatiti ukupna složenost problema vezanog za optimiziranje energetske efikasnosti na osnovu na 4 kategorije kompromisnih odnosa, u cilju maksimalne iskoristivosti raspoloživih resursa uz održavanje zahtijevanog kvaliteta usluge, a uz optimalnu potrošnju električne energije čime se doprinosi »zelenoj evoluciji«, odnosno smanjenju zagađenja okoline, te održivom razvoju društva. Prilikom izrade ove disertacije koristiće se sljedeće metode:

- deskriptivna metoda za opis karakteristika okruženja u mrežama nove generacije i primijenjenih modela upravljanja energetske efikasnosti;
- komparativna metoda za poređenje poznatih modela i prototipa za optimizaciju u mrežnim okruženjima;
- analitičke metode za opisivanje međusobne zavisnosti energetske efikasnosti i četvorostrukih kompromisnih zavisnosti za obezbjeđenje potrebnih kapaciteta i QoS-a;
- metode matematičke sinteze za definisanje matematičkog optimizacijskog modela;
- metode modeliranja i simulacije za potrebe verifikacije predloženih rješenja;
- statističke metode za obradu rezultata mjerenja;

7. PLAN ISTRAŽIVANJA

Predviđeni plan istraživanja slijedi gore navedene definisane zadatke koje treba izvršiti radi postizanja postavljenog cilja. Najprije je potrebno postaviti formalni okvir za identifikaciju i modeliranje interakcija koje se pojavljuju u pristupnim radio mrežama, i to na način da se modeli dobijeni za elementarni model primijene i propagiraju na kompleksnije i realnije situacije unutar fizičkog sloja i/ili (do MAC sloja standardnog protokolskog steka).

Plan istraživanja se sastoji u realizaciji sljedećih zadataka:

- razmatranje i analiza dosadašnjih rezultata koji se zasnivaju na elementarnom modelu, odnosno na scenariju jedne ćelije (jedne bazne stanice) i jedne veze tačka-tačka;
- razmatranje moguće primjene arhitektura mreža nove generacije (mrežno okruženje);
- razmatranje metoda obezbjeđenja QoS-a u mrežama nove generacije s obzirom na uticaj QoS-a na iskoristivost raspoloživih resursa;
- identifikiranje grupe parametara koji imaju direktni ili indirektni uticaj na energetske efikasnost u mrežnom okruženju;
- identifikiranje parametara kojima se određuje energetska efikasnost, integralno, u smislu 4 kategorije kompromisnih zavisnosti;
- izbor optimizacijskog modela za poboljšanje energetske efikasnosti na osnovu pomenutog okvira od 4 optimizacijska modela u mrežnom okruženju;
- izbor odgovarajućih simulacijskih alata u odnosu na bazične osobine poznatih mrežnih simulatora i u odnosu na potrebe predloženog modela;
- valorizacija rezultata istraživanja izbora parametara kojim se određuje ukupno ponašanje sistema i primjenjivost predloženog modela.

8. OČEKIVANI IZVORNI NAUČNI DOPRINOS DISERTACIJE

Ono što je potrebno uraditi u cilju rješenja zadatog problema i dokazivanja postavljene osnovne hipoteze, predstavlja doprinos i definiše se kao analiza realnih i kompleksnih scenarija u bežičnim pristupnim mrežama sa ciljem povećanja energetske efikasnosti za mreže koje konvergiraju realnim topologijama i arhitekturama.

Za očekivati je da korišteni model može poslužiti za razvoj komercijalnih varijanti, ali i za simulaciju mrežnih okruženja za različite scenarije, te može poslužiti za variranje predloženih parametara vezanih za integralnu energetske efikasnost kako bi se utvrdile granice njihovih optimalnih vrijednosti, što može biti i osnova za dalja istraživanja.

9. POLAZNA LITERATURA

- [1] G. P. Fettweis and E. Zimmermann, "ICT Energy Consumption-Trends and Challenges," *Proc. 11th Int. Symp. Wireless Personal Multimedia Commun. (WPMC'08)*, Lapland, Finland, Sept. 2008.
- [2] Y. Chen *et al.*, "Fundamental Tradeoffs on Green Wireless Networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 6, June 2011, pp. 30–37.
- [3] D. Tse and P. Viswanath. *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge Univ. Press, 2005.
- [4] Y. Polyanskiy, H. V. Poor, and S. Verdú. "Minimum Energy to Send kbits With and Without Feedback", Published in: *Information Theory Proceedings (ISIT)*, 2010 IEEE International Symposium on Date of Conference: 13-18 June 2010 Page(s): 221 – 225, Conference Location : Austin, TX Publisher: IEEE
- [5] Badic, B.; O'Farrell, T.; Loskot, P.; He, J, "Energy Efficient Radio Access Architectures for Green Radio: Large Versus Small Cell Size Deployment", *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall)*, 2009 IEEE 70th, 20-23 Sept. 2009, Page(s): 1 – 5
- [6] Li, G.Y., Zhikun Xu ; Cong Xiong ; Chenyang Yang ; Shunqing Zhang ; Yan Chen ; Shugong Xu, "Energy-efficient wireless communications: tutorial, survey, and open issues", 2011, *Wireless Communications*, IEEE Page(s): 28 – 35,
- [7] G. Miao *et al.*, "Cross-Layer Optimization for Energy- Efficient Wireless Communications: A Survey," *Wiley J. Wireless Commun. Mobile Comp.*, vol. 9, no. 4, Apr. 2009, pp. 529–42.
- [8] F. Meshkati, H. V. Poor, and S. C. Schwartz, "Energy-Efficient Resource Allocation in Wireless Networks," *IEEE Sig. Process. Mag.*, vol. 24, no. 3, May 2007, pp. 58–68.
- [9] S. Verdú, "Spectral Efficiency in the Wideband Regime," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 48, no. 6, June 2002, pp. 1319–43.
- [10] Y. Polyanskiy, H. V. Poor, and S. Verdú, "Channel Coding Rate in the Finite Block Length Regime," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 56, no. 5, May 2010, pp. 2307–59.
- [11] M. C. Gursoy, "On the Capacity and Energy Efficiency of Training-Based Transmissions over Fading channels," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 55, no. 10, Oct. 2009, pp. 4543–67.
- [12] V. Chandar, A. Tchamkerten, and D. Tse, "Asynchronous Capacity Per Unit Cost," *Proc. IEEE Int'l. Symp. Info. Theory '10*, Austin, TX, June 2010, pp. 280–84.
- [13] S. Cui, A. J. Goldsmith, and A. Bahai, "Energy-Constrained Modulation Optimization," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 4, no. 5, Sept. 2005, pp. 2349–60.
- [14] Shuguang Cui; Goldsmith, A.J.; Bahai, A., "Energy-Efficiency of MIMO and Cooperative MIMO Techniques in Sensor Networks," *IEEE JSAC*, vol. 22, no. 6, Aug. 2004, pp. 1089–98.
- [15] G. Miao *et al.*, "Energy-Efficient Design in Wireless OFDMA," *Proc. IEEE ICC '08*, Beijing, China, May 2008.
- [16] G. Miao, N. Himayat, and G. Y. Li, "Energy-Efficient Link Adaptation in Frequency-Selective Channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 2, Feb. 2010, pp. 545–54.
- [17] C. Isheden and G. P. Fettweis, "Energy-Efficient Multi- Carrier Link Adaptation with Sum Rate-Dependent Circuit Power," *Proc. IEEE GLOBECOM '10*, Miami, FL, Dec. 2010.
- [18] R. Mangharam *et al.*, *Optimal Fixed and Scalable Energy Management for Wireless Network*, vol. 1, Mar. 2005, pp. 114–25.
- [19] M. Bohge *et al.*, "Dynamic Resource Allocation in OFDM Systems: an Overview of Cross-Layer Optimization Principles and Techniques," *IEEE Network Mag.*, vol. 21, no. 1, Feb. 2007, pp. 53–59.
- [20] G. Miao *et al.*, "Energy Efficient Design in Wireless OFDMA," *Proc. IEEE ICC '08*, Beijing, China, May 2008.
- [21] G. Miao *et al.*, "Interference Aware Energy-Efficient Power Optimization," *Proc. IEEE Int'l. Conf. Commun. (ICC'09)*, Dresden, Germany, June 2009, pp. 1–5.
- [22] 3GPP, R1-101084, "Energy Saving Techniques to Support Low Load Scenarios," www.3gpp.org, Huawei, Tech. Rep., 2010.
- [23] H. Kim *et al.*, "Across-Layer Approach to Energy Efficiency for Adaptive MIMO Systems Exploiting Spare Capacity," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 8, Aug. 2009, pp. 4264–75.

-
- [24] B. Bougard *et al.*, "Smart MIMO: An Energy-Aware Adaptive MIMO-OFDM Radio Link Control for Next Generation Wireless Local Area Networks," *EURASIP J. Wireless Commun. Networking*, vol. 2007, no. 3, June 2007, pp. 1–15.
 - [25] Y. Yang *et al.*, "Relay Technologies for WiMAX and LTE-Advanced Mobile Systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 10, Oct. 2009, pp. 100–05.
 - [26] C. Bae and W. E. Stark, "End-to-End Energy-Bandwidth Tradeoff in Multihop Wireless Networks," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 55, no. 9, Sept. 2009, pp. 4051–66.
 - [27] Z. Zhou *et al.*, "Energy Efficient Cooperative Communication Based on Power Control and Selective Single- Relay in Wireless Sensor Networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 8, Aug. 2008, pp. 3066–78.
 - [28] R. Madan *et al.*, "Energy-Efficient Cooperative Relaying over Fading Channels with Simple Relay Selection," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 8, Aug. 2008, pp. 3013–25.
 - [29] M. Nokleby and B. Aazhang, "User Cooperation for Energy-Efficient Cellular Communications," *Proc. IEEE ICC '10*, Cape Town, South Africa, May 2010.
 - [30] T. C.-Y. Ng and W. Yu, "Joint Optimization of relay Strategies and Resource Allocations in Cooperative Cellular Networks," *IEEE JSAC*, vol. 25, no. 2, Feb. 2007, pp. 328–39.
 - [31] S. Sayed *et al.*, "Energy Efficiency Analysis of Cooperative Access with Relay's Data Algorithm for Multi-Rate WLANS," *IEEE PIMRC '09*, Sept. 2009.
 - [32] Chunxiao Jiang, Haijun Zhang, Yong Ren, and Hsiao-Hwa Chen, "Energy-Efficient Non-Cooperative Cognitive Radio Networks," *IEEE Communications Magazine*, July 2014.
 - [33] I. F. Akyildiz *et al.*, "A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 10, no. 4, Dec. 2008, pp. 520–561.
 - [34] E. Axell *et al.*, "Spectrum Sensing for Cognitive Radio: State-of-the-Art and Recent Advances," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 14, no. 3, Sept. 2012, pp. 1075–1096.
 - [35] C. Jiang *et al.*, "uSD: Universal Sensor Entry Data Card," *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, no. 8, Aug. 2010, pp. 2450–2461.
 - [36] P. Cheng, R. Deng, and J. Chen, "Energy-Efficient Cooperative Spectrum Sensing in Sensor-Aided Cognitive Radio Networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 12, Dec. 2012, pp. 4280–4291.
 - [37] S. Wang *et al.*, "Energy-Efficient Spectrum Sensing and Access for Cognitive Radio Networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 2, Feb. 2012, pp. 700–711.
 - [38] C. Jiang *et al.*, "On Searching Available Channels with Asynchronous MAC-Layer Spectrum Sensing," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 8, Aug. 2010, pp. 2450–2461.
 - [39] Z. Hasan *et al.*, "Energy-Efficient Power Allocation in OFDM-Based Cognitive Radio Systems: A Risk-Return Model," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 12, Dec. 2009, pp. 3698–3709.
 - [40] G. Miao *et al.*, "Distributed Interference-Aware Energy-Efficient Power Optimization," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 4, Apr. 2011, pp. 1250–1261.
 - [41] Z. Zhang *et al.*, "Energy-Efficient Resource Optimization in Spectrum Sharing Two-Tier Femtocell Networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 6, June 2013, pp. 2800–2811.
 - [42] K. Son *et al.*, "Refim: A Practical Interference Management in Heterogeneous Wireless Access Networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 5, May 2011, pp. 1550–1561.
 - [43] T. R. Newman *et al.*, "Designing and Deploying a Building-Wide Cognitive Radio Network Testbed," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 9, Sept. 2010, pp. 10–17.
 - [44] Y. Zhao *et al.*, "Performance Evaluation of Cognitive Radios: Metrics, Utility Functions, and Methodology," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 14, no. 3, Sept. 2012, pp. 1075–1096.
 - [45] K.-M. Kang *et al.*, "Deployment and Coverage of Cognitive Radio Networks in TV White Space," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 1, Jan. 2009, pp. 1–12.
 - [46] C. R. Stevenson *et al.*, "IEEE 802.22: The First Cognitive Radio Wireless Regional Area Network Standard," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 1, Jan. 2009, pp. 13–21.
 - [47] C. Jiang *et al.*, "Analysis on Deployment Parameters of Secondary Users in Cognitive Radio Networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 10, Oct. 2010, pp. 3050–3061.
 - [48] Agapi Mesodiakaki, Ferran Adelantado, Luis Alonso, and Christos Verikoukis, "Energy-Efficient User Association in Cognitive Heterogeneous Networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 7, July 2014, pp. 3800–3811.
 - [49] Small Cell Forum, "Backhaul Technologies for Small Cells: Use Cases, Requirements and Solutions," *Small Cell Forum*, Feb. 2013.
 - [50] 3GPP TS 36.300, "EUTRA & EUTRAN Overall Description," *3GPP*, 2014.
-

-
- [51] NGMN Alliance, Small Cell Backhaul Requirements"
 - [52] Tellabs, Small Cells Address the Growing Demand for Data,"
 - [53] 3GPP TS 36.942, Radio Frequency (RF) System Scenarios,"
 - [54] D. Fooladivanda and C. Rosenberg, oct 2012 Joint Resource Allocation and User Association for Heterogeneous Wireless Cellular Networks
 - [55] H. S. Dhillon et al., 2012 Modeling and Analysis of K-Tier Downlink Heterogeneous Cellular Networks,"
 - [56] 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #61May 2010 Performance of eICIC with Control Channel Coverage Limitation,"
 - [57] A. Damnjanovic et al., June 2011 A Survey on 3GPP Heterogeneous Networks,"
 - [58] K.-C. Huang and Z. Wang, Millimeter Wave Communication Systems,
 - [59] 3GPP TS 36.814, Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects,"
 - [60] Salim Eryigit, Gürkan Gür, Suzan Bayhan, and Tuna Tugcu, July 2014: Energy Efficiency Is a Subtle Concept: Fundamental Trade-offs for Cognitive Radio Networks
 - [61] S. Wang, M. Ge, and W. Zhao, Aug 2013 Energy-Efficient Resource Allocation for OFDM-based Cognitive Radio Networks,"
 - [62] Y. Xing et al., Apr 2007, Dynamic Spectrum Access with QoS and Interference Temperature Constraints,"
 - [63] P. Ren, Y. Wang, and Q. Du, Feb 2014, CAD-MAC: A Channel- Aggregation Diversity Based MAC Protocol for Spectrum and Energy Efficient Cognitive Ad Hoc Networks,"
 - [64] S. Bayhan and F. Alagöz, Feb 2013, Scheduling in Centralized Cognitive Radio Networks for Energy Efficiency,"
 - [65] S. M. Kamruzzaman, E. Kim, and D. G. Jeong, Feb 2011, An Energy Efficient QoS Routing Protocol for Cognitive Radio Ad Hoc Networks,"
 - [66] T. Lan et al., Mar 2010, An Axiomatic Theory of Fairness in Network Resource Allocation,"
 - [67] S.-S. Byun, I. Balasingham, and X. Liang, Sep 2008 Dynamic Spectrum Allocation in Wireless Cognitive Sensor Networks: Improving Fairness and Energy Efficiency,"
 - [68] H. Su and X. Zhang, May 2010, Energy-Efficient Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks,"
 - [69] M. Ge and S. Wang, Apr 2013. Energy-Efficient Power Allocation for Cooperative Relaying Cognitive Radio Networks,"
 - [70] C. Sun and C. Yang, Feb 2012, Energy Efficiency Analysis of One-Way and Two-Way Relay Systems,"
 - [71] X. Zhang and K. G. Shin, Sept 2012, E-mili: Energy-Minimizing Idle Listening in Wireless Networks,"
 - [72] S. Althunibat et al., Aug 2013, On the Trade-Off between Security and Energy Efficiency in Cooperative Spectrum Sensing for Cognitive Radio,"
 - [73] C. Güven, S. Bayhan, and F. Alagöz, Effect of Social Relations on Cooperative Sensing in Cognitive Radio Networks,"
 - [74] H. Li, Social Behaviour in Cognitive Radio, Wiley, 2012." " Ch. 10, Cognitive Communications: Distributed Artificial Intelligence (DAI), Regulatory Policy, Economics, Implementation
 - [75] A. Mukherjee, Apr 2013 , Diffusion of Cooperative Behavior in Decentralized Cognitive Radio Networks with Selfish Spectrum Sensors,"
 - [76] S. Park, H. Kim, and D. Hong, Mar 2013 Cognitive Radio Networks with Energy Harvesting,"
 - [77] Huaizhou Shi, R. Venkatesha Prasad, Vijay S Rao, I. G. M. M. Niemegeers, and Ming Xu July 2014: Spectrum- and Energy-Efficient D2DWRAN
 - [78] J. I. Mitola and J. Maguire, 1999", "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal
 - [79] IEEE 802.22 Working Group, 2014" tech. rep.; <http://www.ieee802.org/22/>.
 - [80] C. Stevenson et al. Jan 2009:" IEEE 802.22: The First Cognitive Radio Wireless Regional Area Network Standard
 - [81] H. Min et al. Dec 2011 Capacity Enhancement Using an Interference Limited Area for Device-to-Device Uplink Underlying Cellular Networks
-

-
- [82] B. Kaufman, J. Lilleberg and B. Aazhang Mar 2013 , Spectrum Sharing Scheme Between Cellular Users and Ad Hoc Device-to-Device Users
 - [83] P. Cheng et al. 2012 Resource Allocation for Cognitive Networks with D2D Communication: An Evolutionary Approach
 - [84] H. Shi et al. Globecom 2013 - Cognitive Radio and Networks Symposium Adapting IEEE 802.22 OFDMA System for P2PWRANs
 - [85] Q. Zhang, J. Jia and J. Zhang Feb 2009 Cooperative Relay to Improve Diversity in Cognitive Radio Networks
 - [86] S. Gezici et al. Jan 2009 Fundamental Limits on Time Delay Estimation in Dispersed Spectrum Cognitive Radio Systems
 - [87] <http://www.cisco.com/> June 10, 2014 Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2012–2017
 - [88] 3GPP 2013 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on LTE Device to Device Proximity Services; Radio Aspects (Release 12), " tech. rep.
 - [89] H. Shi et al. A Fairness Model for Resource Allocation in Wireless Networks
 - [90] S. Wang, M. Ge and W. Zhao Aug 2013 Energy-Efficient Resource Allocation for OFDM-Based Cognitive Radio Networks
 - [91] F. Granelli et al. Jan 2010 Standardization and Research in Cognitive and Dynamic Spectrum Access Networks: IEEE SCC41 Efforts and Other Activities
 - [92] R. Venkatesha Prasad and Przemyslaw Pawelczak, James A. Hoffmeyer, H. Steven Berger April 2008 Cognitive Functionality in Next Generation Wireless Networks: Standardization Efforts
 - [93] Y. Sun and J. Lin 2012 Multi-Carrier Frequency-Offset Estimation Based on MUSIC for Carrier-Aggregation Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Communications
 - [94] Xuemin Hong, Jing Wang, Cheng-Xiang Wang, and Jianghong Shi: Cognitive Radio in 5G: A Perspective on Energy-Spectral Efficiency Trade-off
 - [95] C.-X. Wang et al., Feb 2014 Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks,"
 - [96] S. Haykin, Feb 2005 Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications,"
 - [97] C.-X. Wang et al., Apr 2009 On Capacity of Cognitive Radio Networks with Average Interference Power Constraints,"
 - [98] F. Heliot, M. A. Imran, and R. Tafazolli, May 2012 On the Energy- Efficiency Spectral-Efficiency Trade-Off over the MIMO Rayleigh Fading Channel,"
 - [99] X. Hong et al., Sept 2010 Capacity of Hybrid Cognitive Radio Networks with Distributed VAAs,"
 - [100] I. Humar et al., Mar 2011 Rethinking Energy-Efficiency Models of Cellular Networks with Embodied Energy,"
 - [101] M. Gastpar, 2007 On Capacity Under Receive and Spatial Spectrum-Sharing Constraints,"
 - [102] S. Sridharan and S. Vishwanath, Feb 2008 On the Capacity of A Class of MIMO Cognitive Radios,"
 - [103] X. Kang et al., Feb 2009 Optimal Power Allocation for Fading Channels in Cognitive Radio Networks — Ergodic and Outage Capacity,"
 - [104] M. F. Hanif and P. J. Smith, Feb 2010 On the Statistic of Cognitive Radio Capacity in Shadowing and Fast Fading Environments,"
 - [105] J. G. Andrews, F. Baccelli, and R. K. Ganti, Nov 2011 A Tractable Approach to Coverage and Rate in Cellular Networks,"
 - [106] X. Hong et al., Oct 2013 Energy-Spectral Efficiency Trade-Off in Virtual MIMO Cellular Systems,"
 - [107] I. Ku, C.-X. Wang, and J. S. Thompson, Oct 2013 Spectral-Energy Efficiency Trade-Off in Relay-Aided Cellular Networks,"
 - [108] K. Xue et al., Dec 2013 Performance Analysis and Resource Allocation of Heterogeneous Cognitive Gaussian Relay Channels,"
 - [109] L. Musavian and S. Aissa, Mar 2010 Effective Capacity of Delay- Constrained Cognitive Radio in Nakagami Fading Channels,"
-

- [110] Tao Jiang, Chunxing Ni, Daiming Qu, and Chonggang Wang: Energy-Efficient NC-OFDM/OQAM-Based Cognitive Radio Networks
- [111] Wang, M. Ghosh, and K. Challapali, Mar. 2011 Emerging Cognitive Radio Applications: A Survey,“
- [112] G. F. Elmasry, Oct. 2011 The Progress of Tactical Radios from Legacy Systems to Cognitive Radios,“
- [113] H. Harada et al., Mar. 2013 IEEE Dynamic Spectrum Access Networks Standards Committee,“
- [114] J. I. Mitola and J. Maguire 1999 Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal
- [115] B. R. Salzberg, Dec. 1967 Performance of an Efficient Parallel Data Transmission System,“
- [116] B. Hirosaki, Jul. 1981 An Orthogonally Multiplexed QAM System Using the Discrete Fourier Transform,“
- [117] M. Bellanger, Jan. 2010 „FBMC Physical Layer: A Primer,“<http://www.ict-phydyas.org>”
- [118] B. Farhang-Boroujeny and R. Kempter, Apr. 2008 Multicarrier Communication Techniques for Spectrum Sensing and Communication in Cognitive Radios,“
- [119] S. Sen, R. Senguttuvan, and A. Chatterjee, Mar. 2011, Environment- Adaptive Concurrent Companding and Bias Control for Efficient Power-Amplifier Operation,“
- [120] S. Cui, A. J. Goldsmith, and A. Bahai, Sep. 2005, Energy-Constrained Modulation Optimization,“
- [121] T. Jiang, and Y. Wu, June 2008, An Overview: Peak-to-Average Power Ratio Reduction Techniques for OFDM Signals,“
- [122] D. Qu, S. Lu and T. Jiang, Jan. 2013 Multi-Block Joint Optimization for the Peak-to-Average Power Ratio Reduction of FBMC-OQAM Signals,“
- [123] D. Qu et al., Feb. 2011 Detection of Non-Contiguous OFDM Symbols for Cognitive Radio Systems without Out-of- Band Spectrum Synchronization,“
- [124] N. S. Alagha, and P. Kabal, July 1999 Generalized Raised-Cosine Filters,“
- [125] D. Chen, D. Qu, and T. Jiang, Jan. 2013 Prototype Filter Optimization to Minimize Stopband Energy with NPR Constraint for Filter Bank Multicarrier Modulation Systems,“