

## **ENERGETSKA EFIKASNOST OPTIČKIH, BEŽIČNIH I BEŽIČNO/OPTIČKIH MREŽA ZA PRISTUP**

Aleksandra Kostić-Ljubisavljević, Branka Mikavica  
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

**Sadržaj:** *Uprkos sve većem kapacitetu i mogućnosti da podrži nove aplikacije koje zahtevaju široke propusne opsege, velika potrošnja energije infrastrukture mreža za pristup privlači posebnu pažnju. Pokazano je da mreže za pristup najviše doprinose potrošnji energije i emisiji štetnih gasova. Različite strategije su predložene kako bi se smanjila potrošnja energije u mrežama za pristup, kako u optičkim, bežičnim tako i u kombinovano bežično/optičkim, a u radu se daje pregled nekih predloženih rešenja za povećanje energetske efikasnosti.*

**Ključne reči:** *Enegetska efikasnost, potrošnja energije, bežične mreže za pristup, optičke mreže za pristup, bežično/optičke mreže za pristup*

### **1. Uvod**

Energetska efikasnost telekomunikacionih mreža je pitanje od velikog značaja ne samo u pogledu smanjenja operativnih troškova operatora, već i u pogledu očuvanja životne sredine, smanjenja potrošnje energije iz neobnovljivih izvora i prelazak na obnovljive izvore energije. Sektor telekomunikacija omogućava značajne uštede u potrošnji energije i pruža podršku očuvanju životne sredine. Ovakva reputacija dolazi prvenstveno na osnovu činjenice da su telekomunikacione mreže uticale na transformacije u društvu i obezbedile praktične načine smanjenja uticaja čoveka na životnu sredinu (na primer, aplikacijama za rad od kuće, videokonferencijama, e-trgovinom i njihovim uticajem na kretanja čoveka). Međutim, nezaobilaznost komunikacionih tehnologija u svakodnevnom životu, kako profesionalnom tako i privatnom, donosi nove probleme – potrošnja energije računara i mrežne opreme postaje značajan deo ukupne, globalne potrošnje energije. Istraživanja pokazuju da najveći udeo u potrošnji energije u telekomunikacionim mrežama pripada mrežama za pristup. U ovom radu se daje pregled nekih predloženih rešenja za povećanje energetske efikasnosti optičkih, bežičnih i bežično/optičkih mreža za pristup. Od svih razmatranih rešenja, bežične tehnologije imaju najmanju energetska efikasnost, odnosno, troše najviše energije po korisniku i po bitu prenetih podataka. Kombinacija bežičnog pristupa sa optičkim mrežama za pristup predstavlja obećavajući integrisani pristup za održive i efikasne mreže za pristup naredne generacije, ostvarujući time i mobilnost, kao osnovnu prednost bežičnog pristupa, i širok propusni opseg, kao osnovnu prednost optičkog pristupa.

Ovaj rad je koncipiran na sledeći način. Nakon uvoda, u drugom delu rada se analizira potrošnja energije i mogućnosti povećanja energetske efikasnosti optičkih mreža za pristup. Treći deo rada prikazuje pregled nekih predloženih rešenja za unapređenje energetske efikasnosti bežičnih mreža za pristup. Takođe se analiziraju međunarodni projekti čiji je cilj smanjenje ukupne potrošnje energije u bežičnim komunikacionim mrežama, smanjenje emisije štetnih gasova ali i smanjenje operativnih troškova. Četvrti deo rada predstavlja prikaz kombinovane bežično/optičke mreže za pristup sa aspekta energetske efikasnosti. Na kraju rada su data zaključna razmatranja.

## 2. Energetska efikasnost optičkih mreža za pristup

Optičke tehnologije su široko korišćene u telekomunikacionim mrežama i trenutno čine osnovnu mrežnu infrastrukturu u razvijenom delu sveta. Predloženi su različiti pristupi za poboljšanje energetske efikasnosti optičkih mreža, kao što su različiti pristupi rutiranja, dodeljivanja talasnih dužina i uobličavanja saobraćaja kako bi optičke mreže bile efikasne u pogledu troškova. Minimiziranje potrošnje energije u optičkim mrežama se može izvršiti na četiri nivoa: na nivou komponenti, prenosa, mreža i aplikacija. Na nivou komponenti, razvijene su integrisane *all-optical* komponente kao što su optički baferi, svičevi i konvertori talasnih dužina, što značajno smanjuje potrošnju energije. Na nivou prenosa, uvode se vlakna sa malim slabljenjem i malom disperzijom, kao i energetske efikasne optičke predajnici i prijemnici koji povećavaju energetske efikasnosti prenosa. Energetske efikasne mehanizmi alokacije resursa, *green* rutiranje i optičke mreže za pristup dalekog dometa izučavani su na nivou mreže s ciljem smanjenja potrošnje energije u optičkim mrežama. Na aplikacionom nivou, za smanjenje potrošnje energije predloženi su mehanizmi za energetske efikasno povezivanje mreža, kao što su *green* pristupi za *cloud computing*.

Primena obnovljivih izvora energije u nekim WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) mrežama u cilju smanjenja potrošnje energije iz neobnovljivih izvora, ali i emisije štetnih gasova je analizirana u [1]. Razvijen je model optimizacije linearnim programiranjem i vrlo efikasna heuristika, kako bi se optimizovala potrošnja obnovljive energije u tim mrežama. Rezultati su pokazali da se ovim modelom potrošnja energije iz neobnovljivih izvora smanjuje za 47-52%, uz održavanje ugovorenog QoS-a (*Quality of Service*). Takođe je istraživana uticaj optimalne lokacije čvora koji koriste energiju iz obnovljivih izvora u odnosu na ukupnu potrošnju energije iz neobnovljivih izvora. Rezultati pokazuju da se izborom centralnih čvorova mreže koji će se napajati energijom iz obnovljivih izvora postižu značajno veće uštede u potrošnji ukupne energije u poređenju sa istom u krajnjim čvorovima mreže.

Razvoj *Ethernet* pasivnih optičkih mreža (EPON) je prikazan u [2]. Povećanjem protoka, potrošnja energije značajno raste sa porastom realizovanog protoka. Od velikog značaja je smanjiti potrošnju energije u 10G-EPON-u, čime bi se smanjili operativni troškovi i uticalo na očuvanje životne sredine. Akcenat se stavlja na uštede u potrošnji energije u ONU (*Optical Network Unit*), predlaže se onemogućavanje nekih funkcija ONU kada god je to moguće. Uvode se četiri energetske nivoa ONU. Zatim, na osnovu MAC (*Medium Access Control*) kontrole i upravljanja, razvijaju se šeme pravilnog prelaska sa energetske nivoa ONU [2].

Troškovna i energetska efikasnost su dva važna pitanja o kojima se mora voditi računa pri projektovanju i radu mreže. U [3] se predlaže udaljeno kanalno kombinovanje za WDM na velikim rastojanjima i TDM (*Time Division Multiplexing*) pasivne optičke sisteme. Studije pokazuju da se ostvaruje značajan napredak u pogledu troškovne i energetske efikasnosti. Ostvaruje se do 35% smanjenja potrošnje energije u periodu minimalnog saobraćajnog opterećenja. Periodičnim merenjem je utvrđeno da u poređenju sa konvencionalnim sistemima u potpuno aktivnom radnom stanju može se ostvariti do 20% smanjenja potrošnje energije.

Transparentne WDM mreže predstavljaju obećavajuće rešenje za smanjenje potrošnje energije u telekomunikacionim mrežama [4]. Razmatrani su različiti aspekti rutiranja na osnovu energetske efikasnosti. Polazi se od toga da u nekim slučajevima smanjenje ograničenja može imati pozitivne efekte na ukupne performanse mreže, posebno na verovatnoću blokiranja. Razlog za to je dužina putanje u pristupu koji posmatra samo energetska efikasnost. Te putanje mogu biti suviše duge, čime se povećava nivo fragmentacije resursa mreže, sa štetnim uticajem na verovatnoću blokiranja u mreži. Predložen je novi pristup, WPA-LR (*Weighted Power Aware Lightpath Routing*), koji razmatra i minimizaciju potrošnje energije i verovatnoću blokiranja [4]. Rezultati potvrđuju prednost predloženog pristupa kako u pogledu energetske efikasnosti, tako i u pogledu iskorišćenosti resursa mreže, i ukazuje se na to da primena rešenja samo na osnovu ušteda u potrošnji energije može dovesti do značajnog pada performansi mreže.

Energetski efikasna rešenja u komunikacionim mrežama su neophodna usled očekivanog rasta obima saobraćaja u narednim godinama. Povećanje obima saobraćaja utiče na povećanje zahteva za potrošnjom energije u jezgru mreže. Za suočavanje sa sve većim zahtevima u pogledu potrošnje energije, predložena su različita energetska efikasna rešenja, tako da se energija troši proporcionalno efektivnom saobraćaju. Takva rešenja su „*traffic-aware*“. U literaturi postoji više predloženih *traffic-aware* šema. Neke od njih razmatraju optičke pojačavače, druge šeme razmatraju optoelektronske uređaje. Metod za poređenje različitih *traffic-aware* strategija, uzimajući u obzir scenario u mreži, fluktuacije saobraćaja, uštede u potrošnji energije i složenost različitih pristupa predložen je u [5].

Osnovna razlika između mreža za pristup u kontekstu energetske efikasnosti je u načinima na koji se korisnik (ili ONU) povezuje sa OLT (*Optical Line Terminal*) u centralnom kabinetu, i na koji način pristupa resursima mreže. Pored toga što je arhitektura mreža za pristup naredne generacije (TDMA (*Time Division Multiple Access*), PON, hibrid TDMA/PON, PtP (*Point-to-Point*), aktivne optičke mreže) sasvim različita, ova rešenja zahtevaju različite skupove funkcionalnosti u ONU. Predloženo je nekoliko tehnika za uštedu energije [6]. Kao adekvatan kriterijum za klasifikaciju tih tehnika mogu poslužiti podešavanja ONU prijemnika i predajnika dok je ONU u režimu uštede energije. U tom smislu, razlikuju se sledeća stanja: *shedding* (rasipanje energije), *dozing* (dremanje) i *sleeping* (spavanje). Stanje rasipanja energije se odlikuje isključivanjem ili smanjivanjem snage za neesencijalne funkcije i servise. Stanje rasipanja energije isključuje interfejs koji se ne koriste [7]. Postoji više klasa rasipanja energije u zavisnosti od interfejsa koji se mogu isključiti. Stanje dremanja odlikuje dodatno isključivanje ONU predajnika u značajnim intervalima vremena pod uslovom da prijemnik ostaje uključen. Stanje spavanja podrazumeva da su i ONU predajnik i ONU

prijemnik isključeni u značajnim intervalima vremena. Važno je uočiti razliku između režima rada i stanja. Režim predstavlja kombinaciju stanja u zavisnosti od saobraćajnog opterećenja. Na primer, dremanje kao režim rada se odnosi na ciklični prelazak između stanja rasipanja energije i stanja dremanja, a spavanje kao režim rada podrazumeva ciklične prelaske između stanja rasipanja energije, dremanja i stanja spavanja. Spavanje kao režim rada se u zavisnosti od perioda "spavanja" može dalje podeliti na duboki san, gde predajnik i prijemnik ostaju isključeni tokom trajanja stanja uštede energije, i brzi san, gde se stanje uštede energije sastoji iz sekvence ciklusa spavanja, od kojih se svaki sastoji iz perioda spavanja i aktivnog perioda. Primena režima uštede energije može smanjiti potrošnju [7]. Za duge intervale režima uštede, 40G-TDMA-PON, TWDM-PON kao hibrid TDMA-PON i WDM, 10G-EPON, EPON, WDM-PON, AON (*All Optical Networks*) i PtP ostvaruju približno istu potrošnju energije. Međutim, tokom perioda visokog opterećenja, potrošnja energije razmatranih tehnologija zavisi od trajanja ciklusa. U tom slučaju, režim dremanja može smanjiti potrošnju energije između 50 i 75%, dok režim spavanja smanjuje potrošnju energije od 72 do 92%.

### 3. Energetska efikasnost bežičnih mreža za pristup

Zbog sve većih zahteva za prenos podataka i naprednih tehnologija radio prenosa, bežične mreže troše sve više energije i sve više doprinose emisijama ugljen-dioksida. Najveći udeo emisije ugljen-dioksida u mobilnim komunikacionim mrežama pripada mrežama za pristup. U poređenju s tim, potrošnja energije i odgovarajuća emisija ugljen-dioksida mobilnih uređaja i servera u jezgru mreže je 4-5 puta manja. Posmatrajući samo potrošnju energije tokom operativnog perioda mobilnih uređaja, uočava se da iznosi svega nekoliko procenata ukupne potrošnje [8].

Osnovni koncepti energetske efikasnosti komunikacija su prikazani u [9]. Sumirane su napredne tehnike za ostvarivanje energetske efikasnosti uključujući i informaciono-teoretsku analizu, OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) mreže, MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) tehnike, relejni prenos i alokaciju resursa za signalizaciju. Istraživanja pokazuju da se veće uštede u potrošnji energije mogu ostvariti kroz energetske efikasne dizajne. Obzirom da su mreže za pristup projektovane tako da podržavaju vršne vrednosti saobraćaja, iskorišćenost baznih stanica može biti vrlo neefikasna u vremenu van časa glavnog opterećenja jer saobraćajni profil varira sa vremenom. Dinamičko isključivanje bazne stanice kako bi se smanjila potrošnja energije uzimajući u obzir vremensku karakteristiku saobraćajnog profila je razmatrano u [10]. Pokazuje se da su srednja vrednost i varijansa saobraćaja i iskorišćenost bazne stanice dominantni faktori koji određuju količinu uštede u potrošnji energije koja se može ostvariti.

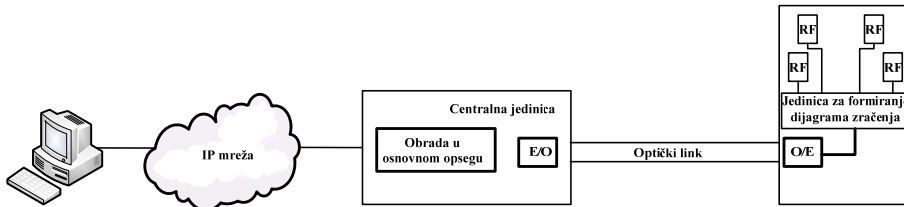
Postojeća bežična rešenja još uvek ne mogu obezbediti korisnicima željenu konektivnost usled malih raspoloživih kapaciteta i nedostatka uniformisanosti servisa. Obzirom da je spektar ograničen i skupe su licence, uspeh budućih *beyond 4G* sistema zahteva efektivna rešenja kako bi se prevazišao jaz između zahtevanog kvaliteta servisa i ograničenih resursa mreže. Spektar je jedan od najvrednijih nacionalnih resursa, čime se naglašava važnost njegove efikasne upotrebe. Međutim, energetska efikasnost takođe postaje jedno od gorućih pitanja za male forme mobilnih uređaja usled sve veće disproporcije između dostupnog i zahtevanog kapaciteta baterije. Energetska efikasnost

bežičnih sistema sa više dostupnih tehnologija radio pristupa je analizirana u [11]. Problem striktno maksimizacije energetske efikasnosti korisničkog mobilnog uređaja je rešen analitički za proizvoljan broj tehnologija radio pristupa sa nekoliko praktičnih ograničenja, kao što su minimalni protok i maksimalno dozvoljena snaga na predaji. Potvrđuje se da predloženi model kontrole potrošnje energije smanjuje potrošnju energije u mobilnim uređajima, dok istovremeno održava zahtevani protok. Rezultati istraživanja pokazuju da strategija kontrole potrošnje energije predložena u [11] može postati dobar izbor za buduće integrisane *beyond 4G* bežične sisteme.

Novi dizajn za kooperativne heterogene bežične mreže za 5G bežične komunikacione sisteme koji ima za cilj balansiranje i optimizaciju spektralne efikasnosti, energetske efikasnosti i kvaliteta servisa je predložen u [12]. Analizira se i višenivovsko upravljanje interferencijom i kontrola potrošnje energije, kao i dinamička alokacija resursa u heterogenim bežičnim mrežama. Predloženi okvir može značajno uvećati energetske i spektralne efikasnost za evoluciju bežičnih tehnologija ka 5G komunikacionim sistemima.

Postoji više međunarodnih projekata koji razmatraju pitanje energetske efikasnosti komunikacionih sistema i njihovih komponenata na različitim nivoima. *OPERA-Net* [13] ispituje mogućnosti unapređenja energetske efikasnosti širokopoljanskih ćelijskih mreža razmatranjem optimizacije sistema za rashlađivanje i obnavljanja energije baznih stanica i optimizacije komponenata korišćenih u komunikacionim sistemima. Projekti *PANAMA* [14], *ELBA* [15] i *Class-S* [16] se odnose na efikasniji dizajn pojačavača u baznim stanicama koji najčešće još uvek rade sa niskim nivoom energetske efikasnosti. Projekat *Cool Silicon* [17] se zasniva na optimizaciji pojedinačnih aspekata kao što je arhitektura sistema, komunikacioni algoritmi i protokoli kao i fizičke komponente u tri osnovne oblasti: mikro/nano tehnologija, širokopoljnog bežičnog pristupa i bežičnih senzorskih mreža. Projekat *VCE Green Radio* [18] ima za cilj proširivanje studija energetske efikasnosti za ćelijske i *end-to-end* komunikacije. Konzorcijum sastavljen od partnera iz industrije, obrazovanja i malih i srednjih preduzeća je započeo evropski projekat „*Energy Aware Radio and Network Technologies*“ (*EARTH*) u januaru 2010. Godine. *EARTH* se odnosi na mobilne širokopoljne mreže, LTE (*Long Term Evolution*) i *LTE-Advanced*. Cilj je ostvariti rezultate u pogledu arhitekture mreža i strategije razvoja, tj. malih *indoor* i *outdoor* ćelija, mehanizama upravljanja i inovativnog dizajna komponenata, sve u skladu sa optimizovanom energetske efikasnošću. *EARTH* ima za cilj smanjenje ukupne potrošnje energije u mobilnim širokopoljanskim mrežama za 50%, značajno smanjenje emisije ugljen-dioksida i smanjenje operativnih troškova. Najveći deo u redukciji se postiže tokom niskog opterećenja mreže, obezbeđujući da potrošnja energije u mrežama za pristup bude proporcionalna obimu saobraćaja. Nešto drugačiji pristup predložen je od strane *Green Touch* Inicijative. Polazeći od teorije informacija i računarske tehnike, *Green Touch* analizira osnovna ograničenja globalnih komunikacionih sistema. *Alcatel-Lucent Bell Labs* su preuzeli inicijativu za pomeranje ovih ograničenja ka jedinstvenoj energetske efikasnoj platformi i formiran je konzorcijum proizvođača opreme, telekomunikacionih operatora i vodećih fakulteta. Cilj je potpuno novi pristup komunikacionim sistemima i fundamentalna istraživanja u oblasti teorije informacija i elektronskih uređaja.

Razmatrane su energetske efikasne tehnike prenosa za LTE, koje su predložene u okviru *EARTH* projekta, sa naglaskom na formiranje dijagrama zračenja, rekonfigurabilne antenske sisteme i MIMO. Cilj je da se operatorima omogući šira oblast pokrivenosti, naročito u manje naseljenim područjima uz obezbeđivanje visokog nivoa efikasnosti, čime se smanjuje i emisija ugljendioksida i štetnih gasova. Kako bi se ovaj cilj ostvario, razvijane su različite strategije na različitim nivoima. Referentni scenario koji je razmatran u [19], urbano okruženje sa makro i pikoćelijama, definisano je u [20], gde je, između ostalnog, specificiran set referentnih postavki za modelovanje urbanih makro i pikoćelija. U scenariju sa makroćelijama, razmatraju se bazne stanice sektorisane u heksagonalnu rešetku na međusobnom rastojanju od 500 m. U scenariju sa pikoćelijama nema sektorizacije. Porede se mobilnost korisnika, prosečan broj korisnika po ćeliji, kao i povećani obim saobraćaja po korisniku pikoćelijama i makroćelijama. U slučaju makroćelija najveću potrošnju energije ostvaruje pojačavač, dok u slučaju pikoćelija najveću potrošnju energije ima interfejs za prenos u osnovnom opsegu. U konvencionalnim baznim stanicama, potrošnja energije zavisi od obima saobraćaja; najveću potrošnju ostvaruje pojačavač a potrošnja opada sa smanjenjem obima saobraćaja. Iz ugla funkcionalne perspektive, antenski sistem u ćelijskim mobilnim sistemima alocira komunikacione resurse u prostornom domenu na lokacije koje se mogu iskoristiti. Na osnovu prostornog raspoređivanja, deo resursa može biti dostupan u ograničenoj oblasti, omogućavajući korišćenje istih resursa u susednoj oblasti. Do danas, većina antenskih sistema ima karakteristike koji su fiksni tokom dugog vremenskog intervala u trajanju nekoliko meseci ili duže, dok se promene i prostorni raspored u saobraćajnom opterećenju menjaju mnogo brže na vremenskoj skali. Ideja rekonfigurabilnih antenskih sistema je adaptivna promena karakteristika antene u skladu sa promenama u prosečnom saobraćajnom opterećenju i prostornom rasporedu saobraćajnog opterećenja, tako da je omogućena dinamička dostupnost komunikacionih resursa u skladu sa zahtevima. Rezultat toga je efikasnije upravljanje resursima čime se omogućava bolja energetska efikasnost. Rekonfigurabilni antenski sistem se sastoji od dve osnovne komponente: podesivi antenski sistem i kontrolni sistem koji je deo upravljanja mrežom. Cilj kontrolnog sistema je donošenje odluka u skladu sa merenjima saobraćaja i iskorišćenju resursa, kada dolazi do promene parametara antena u cilju unapređenja performansi sistema. Vremenski interval u kojem dolazi do promena parametara zavisi od promena saobraćaja, koliko brzo i precizno se te promene mogu uočiti kao i koliko brzo je poželjeno da antenski sistem reaguje. Vremenski intervali mogu biti od nekoliko časova do dana, nedelje ili čak i duže. Aktivni antenski sistem uključuje određen broj aktivnih antenskih elemenata raspoređenih u nizu, čime se omogućava takav oblik zračenja da može biti daljinski kontrolisan. Svaki aktivni antenski element sadrži određen broj standardnih antenskih elemenata i kompletan radio primopredajnik povezan sa jedinicom za formiranje dijagrama zračenja, koja omogućava digitalnu obradu dijagrama zračenja. Aktivna antena je povezana sa centralnom jedinicom, gde se vrši obrada u osnovnom opsegu, preko optičkog vlakna primenom E/O (*electrical/optical*) i O/E (*optical/electrical*) primopredajnika kao što je prikazano na Slici 1. Uočen je pad u potrošnji energije za 30% kao funkcija ostvarenog protoka. Poboljšanje energetske efikasnosti dnevno u proseku iznosi do 40% [19].



Slika 1. *Aktivni antenski sistem*

Prenos jednoantenskim sistemom obezbeđuje najnižu potrošnju energije bazne stanice i za viša opterećenja mreže, ali ne može obezbediti opsluživanje korisnika krajnjih ćelija sa protokom od 1Mb/s. Za saobraćaj od 70 do 90 Mb/s/km<sup>2</sup>, 2x2 MIMO pruža najprihvatljiviju pokrivenost i energetska efikasnost. U slučaju viših opterećenja mreže, na primer, 120Mb/s/km<sup>2</sup>, potrebne su 4 predajne antene da bi se obezbedio garantovani protok od 1Mb/s korisnicima koji se nalaze u krajnjim ćelijama [19].

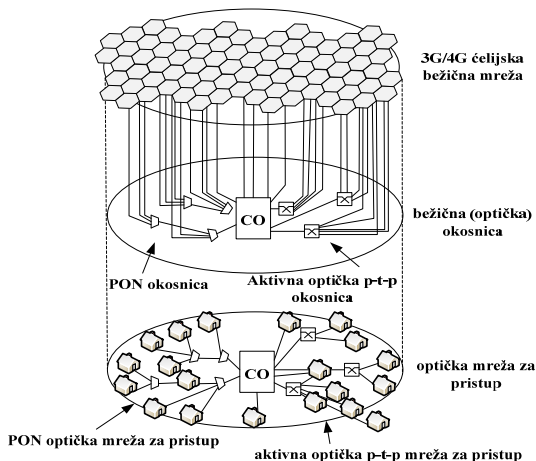
#### 4. Energetska efikasnost kombinovanih bežično/optičkih mreža za pristup

Uprkos sve većem kapacitetu i mogućnosti da podrži nove aplikacije koje zahtevaju široke propusne opsege, velika potrošnja energije infrastrukture mreža za pristup privlači posebnu pažnju. Obzirom da optičke mreže za pristup obezbeđuju izuzetno širok propusni opseg, praktično nezavisan od rastojanja i energetski efikasan, kombinacija mobilnog bežičnog pristupa sa optičkim mrežama za pristup predstavlja obećavajući integrisani pristup za održive i efikasne mreže za pristup naredne generacije. Bežični ćelijski sistemi i optičke mreže za pristup čine sinergiju i imaju komplementarna svojstva. Osnovna prednost ovakvog bežičnog pristupa je mobilnost i dostupnost, dok optičke mreže za pristup obezbeđuju visoke protoke, malu potrošnju energije i robustnost.

Kombinovana mreža se može podeliti na tri različite ravni, tj. tri različite mreže koje koegzistiraju na istom prostoru i dele i korisnike nastanjene u toj oblasti i dostupne resurse u centralnom kabinetu. Donja ravan predstavlja optičku pristupnu mrežu koja obezbeđuje pristup Internetu rezidencijalnim i poslovnim korisnicima sa vrlo velikim protocima. Dva različita načina optičkog pristupa, naime, PtP mreža zasnovana na optičkom *Ethernet-u*, tj. aktivna optička mreža za pristup sa instaliranim *Ethernet switch-evima*, i *point-to-multipoint* optička mreža za pristup, tj. pasivna optička mreža (PON) su razmatrana u [21]. Srednja ravan predstavlja optičku okosnicu za 3G/4G ćelijske bežične mreže, koje su predstavljene gornjom ravni na Slici 2.

Pretpostavlja se da se stanovništvo na nekom području može podeliti na tri gustine naseljenosti, tako da u se u rezidencijalnom delu područje deli na urbane, suburbane i ruralne oblasti. Aktivnost korisnika mreže se razmatra kroz definisanje faktora aktivnosti, koji pokazuje koliko korisnika je aktivno u proseku, u svakom pojedinačnom trenutku vremena u toku dana. Faktori aktivnosti se zasnivaju na statističkim podacima i merenjima i prati sinusoidalnu krivu sa maksimumom u popodnevnim časovima između 18h i 21h i minimumom u ranim jutarnjim časovima. Dodavanje femtoćelija na postojeće makroćelije dovodi do porasta ukupne potrošene energije [21]. Ipak, femtoćelije imaju mogućnost da obezbede više protoke po korisniku. Zato, mreže femtoćelija ako su sa visokim stepenom iskorišćenja, mogu ostvariti visoku

energetsku efikasnost merenu u Gbit/s/W. Za visoke prosečne protoke, energetska efikasnost raste sa porastom oblasti pokrivenosti femtoćelija. Time, iako dodavanje baznih stanica femtoćelija dovodi do veće ukupne potrošnje energije, prednost obezbeđivanja visokih protoka po korisniku rezultuje manjom potrebnom energijom za slanje određene količine podataka. Ipak, ako visok protok po korisniku koji se može ostvariti u femtoćelijama ostaje neiskorišćen, energetska efikasnost opada sa porastom oblasti pokrivenosti femtoćelija. Najveća energetska efikasnost i najveće relativne uštede energije se mogu ostvariti u mreži primenom samo femtoćelija jer su ostvarivi visoki protoci po korisniku, i veliki broj baznih stanica se može prebaciti na režim uštede energije.



Slika 2. Ravni kombinovane bežično/optičke mreže za pristup

U urbanim zonama, velika pokrivenost se postiže postavljanjem manjeg broja baznih stanica. Time, ukupna potrošnja energije u LTE mreži sa optičkom okosnicom u urbanoj zoni je značajno manja od iste u suburbanoj zoni. Istovremeno, manji broj baznih stanica femtoćelija može preći u režim uštede energije zbog velike gustine populacije, čime raste broj aktivnih korisnika. Stoga, relativne uštede energije nisu tako velike kao u suburbanoj zoni, ali je količina prenetih podataka po jedinici potrošene energije 2 do 3 puta veća [21]. Mreža u ruralnoj zoni potroši oko 15 puta više energije od one potrebne za napajanje mreže u urbanoj zoni [21]. Energetska efikasnost izmerena u Gbit/s/W je 5-15 puta manja u ruralnoj zoni od one u urbanoj [21]. U ruralnim oblastima potrošnja energije raste brže od ostvarivog prosečnog protoka kada raste broj postavljenih baznih stanica femtoćelija. Zbog toga čak i za vrlo visoke prosečne protoke kombinovana optička i ćelijska bežična mreža ostvaruje malu energetska efikasnost u ruralnim zonama. Zato, primena ovih scenarija za femtoćelije u ruralnim zonama ne donosi nikakvu prednost u smislu ukupne potrošnje energije i ostvarivih protoka po jedinici energije.

## 5. Zaključak

Obzirom da pitanje potrošnje energije i zaštite prirodne sredine privlači sve veću pažnju javnosti poslednjih godina, istražuju se novi načini i tehnološka rešenja za



uštedu energije u mnogim naučnim disciplinama. Postoje dva pravca istraživanja u cilju rešavanja ovih problema. Prvo, predlaže se upotreba obnovljivih izvora energije koji bi zamenili tradicionalne izvore. Ovo ne samo da daje mogućnost smanjenja potrošnje energije iz tradicionalnih izvora, već predstavlja društveno odgovorno ponašanje u pogledu zaštite životne sredine. Drugo, pristupi uštede energije su istraživani u mnogim oblastima nauke i tehnike, razvija se oprema sa malom potrošnjom energije, ne samo kako bi se smanjio trošak, već i da bi se pomoglo zaštititi životne sredine. U ovom radu se analizira energetska efikasnost u mrežama za pristup, i to optičkim, bežičnim i kombinovano bežično/optičkim. Primena režima uštede energije može značajno doprineti povećanju energetske efikasnosti u optičkim mrežama za pristup. Zbog sve većih zahteva za prenos podataka i naprednih tehnologija radio prenosa, bežične mreže troše sve više energije i sve više doprinose emisijama ugljendioksida. Najveći udeo emisije štetnih gasova pripada mrežama za pristup. Predloženo je više rešenja koja razmatraju pitanje energetske efikasnosti na različitim nivoima i u radu se daje pregled nekih od njih. Postoje različiti načini kombinovanja bežičnih mreža sa optičkim pristupom, i u radu su prikazani neki predloženi modeli sa aspekta energetske efikasnosti.

### Zahvalnica

Ovaj rad je deo istraživanja u okviru projekta TR32025 Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

### Literatura

- [1] X. Dong et al, „IP Over WDM Networks Employing Renewable Energy Sources“, *Journal of Lightwave Technology*, vol.29, no. 1, January 2011, pp. 3-14
- [2] J. Zhang, N. Ansari, “Toward Energy-Efficient 1G-EPON and 10G-EPON with Sleep-Aware MAC Control and Scheduling”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no.2, February 2011, pp. 59-64
- [3] H. Feng et al, “Cost-Effective Introduction and Energy-Efficient Operation of Long-Reach WDM/TDM PON Systems”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 21, November 2011, pp. 3135-3143
- [4] P. Wiatr et al, „Power Savings versus Network Performance in Dynamically Provisioned WDM Networks“, *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no.5, May 2012, pp. 48-55
- [5] A. Morea et al, „Traffic variation-aware networking for energy efficient optical communications“, *The 17th International Conference on Optical Network Design and Modeling*, Brest, France, 2013.
- [6] ITU-T. Rec. G.Sup45, GPON Power Conservation, 2009.
- [7] A. Dixit et al, “Evaluation of ONU power saving modes in next generation optical access networks,” *Proc. of European Conf. on Optical Communication*, Amsterdam, Netherlands, 2012
- [8] O. Blume, D. Zeller, U. Barth, „Approaches to Energy Efficient Wireless Access Networks“, *4th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, Limassol, Cyprus, 2010.

- [9] G. Ye Li et al, „Energy-Efficient Wireless Communications: Tutorial, Survey, and Open Issues“, *IEEE Wireless Communications*, vol. 18, no. 6, December 2011, pp. 28-35
- [10] E. Oh, B. Krishnamachari, “Energy Savings through Dynamic Base Station Switching in Cellular Wireless Access Networks”, *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, Miami, Florida, USA, 2010.
- [11] O. Galinina et al, “Optimizing energy efficiency of a multi-radio mobile device in heterogeneous beyond-4G networks”, *Performance Evaluation*(2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.peva.2014.06.002>
- [12] R. Qingyang Hu, Y. Qian, „An Energy Efficient and Spectrum Efficient Wireless Heterogeneous Network Framework for 5G Systems“, *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no.5, May 2014, pp. 94-101
- [13] Optimising Power Efficiency in mobile Radio Networks (OPERANet), EUREKA CELTIC project, Available: <http://opera-net.org/default.aspx>
- [14] Power Amplifiers and Antennas for Mobile Applications (PANAMA),EUREKA CATRENE project, 2009-2011
- [15] Energy Efficiency of linear power amplifiers for mobile telecommunication base stations (ELBA), BMBF research project, 08/2006 - 07/2009, Available: <http://www.pt-it.pt-dlr.de/de/1760.php>
- [16] Class-S, BMBF research project, 09/2006 - 02/2010, Available: <http://www.ptit.pt-dlr.de/de/1760.php>
- [17] Spitzencluster COOL SILICON, Available: [www.cool-silicon.de/](http://www.cool-silicon.de/)
- [18] “Green Radio – Sustainable Wireless Networks”, Mobile VCE, Feb.2009. Available: [http://www.mobilevce.com/downloads-publ/mtg284Item\\_1503.ppt](http://www.mobilevce.com/downloads-publ/mtg284Item_1503.ppt)
- [19] F. D. Cardoso, “Energy Efficient Transmission Techniques for LTE”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no.10, October 2013, pp. 182-190
- [20] H. Holtkamp, A. Ambrosy, Eds., “Definition and Parameterization of Reference Systems and Scenarios”, EARTH Project, Deliverable D2.2, Brussels, Belgium, June 2010, (<https://www.ict-earth.eu>)
- [21] S. Aleksic et al, “Energy efficiency of femtocell deployment in combined wireless/optical access networks”, *Computer Networks*, vol. 57, no. 5, 2013, pp. 1217-1233

**Abstract:** *Despite the growing capacity and ability to support new applications requiring high bandwidth, large energy consumption of access networks infrastructure attracts special attention. It's shown that access networks contribute the most to energy consumption and emissions of greenhouse gasses. Various strategies are proposed in order to reduce energy consumption in access networks, both in optical, wireless, and in combined wireless/optical. The paper presents an overview of some proposed solutions for energy efficiency enhancement.*

**Keywords:** *Energy Efficiency, Energy Consumption, Wireless Access Networks, Optical Access Networks, Combined Wireless/Optical Access Networks*

## ENERGY EFFICIENCY OF OPTICAL, WIRELESS, AND COMBINED WIRELESS/OPTICAL ACCESS NETWORKS

Aleksandra Kostić-Ljubisavljević, Branka Mikavica