

HIBRIDNE OPTIČKO-BEŽIČNE MREŽE NAREDNE GENERACIJE

Goran Marković, Valentina Radojčić
Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet

Sadržaj: *Hibridne optičko-bežične (Fi-Wi) mreže, bazirane na DWDM tehnologiji u prenosu milimetarskih signala optičkim vlaknom do udaljenih baznih stanica i bežičnom prenosu u poslednjim metrima do korisnika, smatraju se realističnim konceptom za realizaciju fiksnog širokopolasnog bežičnog pristupa. Osnovna karakteristika hibridnog koncepta ogleda se u tome što kombinuje prednosti obe tehnologije - inherentno veliki propusni opseg optičkog vlakna i veliki, neiskorišćeni deo spektra koji je na raspolaganju u milimetarskom opsegu učestanosti. Kao posledica toga, ovakav integrisani koncept biće u mogućnosti da obezbedi izuzetno velike brzine prenosa podataka i malo kašnjenje za potrebe širokopolasnih servisa naredne generacije.*

Ključne reči: *optička mreža, bežični mm RF signal, optičko-bežična integracija.*

1. Uvod

Poslednje decenije, svedoci smo sve šire implementacije i prodora optičke tehnologije sa nivoa transportnih mreža do poslednje milje u mrežama za pristup. Tehnologija pasivne optičke mreže PON (Passive Optical Networks) postala je obećavajuća solucija za pristupne mreže. Sadašnji razvoj PON-a se zasniva na dva osnovna standarda: ITU-T G.984 Gigabit PON (GPON) i IEEE 802.3ah Ethernet PON (EPON). Za servis provajdere, PON pruža značajnu prednost kao što su niži operativni troškovi, transparentnost brzine prenosa i formata signala, kao i mogućnost podrške novih tehnologija. Telekomunikaciona industrija nastavlja proces transformacije mrežne arhitekture u konfiguraciju NG-PON (Next Generation PON), koja uključuje i *hibridnu* optičko-bežičnu pristupnu arhitekturu.

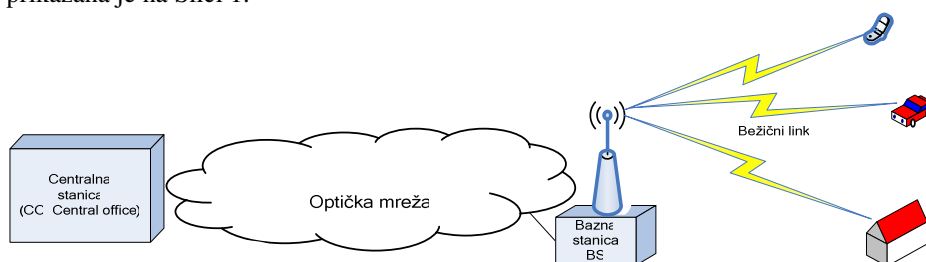
Trenutno raspoloživi bežični standardi, kao što su Wi-Fi, GSM, UMTS i drugi koncentrisani su u nižim delovima mikrotalasnog RF (Radio Frequency) spektra. Noviji standardi, kao što su Wi-Max i LTE, dodatno će unaprediti i proširiti mogućnosti postojećih standarda, ali će i ovi standardi takođe biti bazirani na korišćenju nižih mikrotalasnih opsega (2-4GHz), što će dodatno povećati zauzetost već prezauzetog mikrotalasnog dela RF spektra. Za potrebe budućih širokopolasnih bežičnih servisa na kraćim rastojanjima trenutno se razmatra upotreba nezauzetih delova RF spektra iz milimetarskog (mm) ili sub-milimetarskog opsega, posebno za primenu unutar zatvorenog prostora. Kao jedan od potencijalnih opsega, poslednjih godina razmatra se nelicencirani

deo spektra u okolini 60GHz (5 mm). Zbog izuzetno velikog propagacionog slabljenja, koje je dominantno na ovako visokim učestanostima, neminovno je korišćenje pikoćelijske ili mikroćelijske arhitekture za efikasno pokrivanje, što podrazumeva implementaciju velikog broja manjih baznih stanica u blizini korisnika. Sa izrazito rapidnim porastom zahtevanih protoka po svakoj baznoj stanici neophodno je korišćenje optičke *backbone* infrastrukture za podršku ultra-brzih konekcija između centralne stanice (CO, Central Office) i svih baznih stanica (BS, Base Station). To ukazuje na neophodnost integracije optičke i bežične infrastrukture u jedinstvenu *backhaul* arhitekturu. U takvim sistemima, prenos signala između CO i udaljenih BS vršio bi se putem optičkih vlakana, a zatim bi se u poslednjim metrima do korisnika prenos ostvarivao bežičnim putem u mm RF opsegu učestanosti. S obzirom na kombinovano korišćenje optičke tehnologije i bežičnog prenosa ovakav hibridni koncept, koji koristi prednosti i optičke i bežične tehnologije, poznat je pod nazivom Fi-Wi (Fiber Wireless) ili RoF (Radio-over fiber) [1-5]. Poslednjih godina pokrenuti su značajni istraživački poduhvati usmereni ka potencijalnoj implementaciji ovakvih sistema. Do sadu su predložene različite Fi-Wi arhitekture koje kombinuju različite tehnologije bežičnih LAN (WLAN) i bežičnih *mesh* mreža (WMN, Wireless Mesh Network) sa optičkim pristupnim infrastrukturama, zasnovanim na PON tehnologiji [6,7].

Cilj rada je da prikaže osnovne aspekte i prednosti integrisanog optičko bežičnog koncepta, kao jednog od potencijalnih rešenja mreža za pristup naredne generacije. Opisane su najznačajnije oblasti primene za *indoor* okruženja i predstavljena je jedna od potencijalnih Fi-Wi primena u *outdoor* zonama za potrebe realizacije komunikacionih sistema za vozila na autoputevima. Takođe, ukratko je opisan predlog Fi-Wi integracije naredne generacije WLAN i EPON baziranih mreža.

2. Opis Fi-Wi sistema

Fi-Wi sistemi koriste pogodnosti širokog raspoloživog opsega učestanosti u milimetarskom delu RF spektra zajedno sa inherentno velikim propusnim opsegom i malim slabljenjem optičkog vlakna. Takva hibridna arhitektura je u mogućnosti da obezbedi veoma velike brzine prenosa za potrebe bežičnih širokopoljnih servisa (preko 1 Gb/s, u poređenju sa današnjim WLAN standardima koji omogućavaju maksimalne protoke do 100 Mb/s ili mobilnim celularnim 3G sistemima sa protocima do nekoliko Mb/s) uz minimalno vremensko kašnjenje. Pojednostavljena arhitektura Fi-Wi sistema prikazana je na Slici 1.



Slika 1. Arhitektura Fi-Wi sistema

Konceptualnu arhitekturu FiWi sistema čini centralna stanica koja je povezana sa velikim brojem baznih stanica putem optičke distributivne mreže. Kod klasičnih bežičnih komunikacionih sistema, procesiranje RF signala (modulacija, konverzija frekvencije, multipleksiranje i sl) vrši se na strani svake bazne stanice. Za razliku od klasičnih, u Fi-Wi komunikacionim sistemima omogućeno je da se sva procesiranja RF signala obavljaju centralizovano, a zatim se RF signali prenose (uz mala slabljenja) optičkim putem do baznih stanica. Na taj način Fi-Wi sistemi omogućavaju značajno smanjenje kompleksnosti opreme u baznim stanicama, jer je u njima potrebno izvršiti samo opto-elektronsku konverziju i pojačanje signala, pre nego što se signal dovede na ulaz predajne antene. U hibridnom FiWi konceptu, premeštanjem osnovnih mrežnih funkcija koje se odnose na komutaciju, rutiranje i procesiranje signala na centralni nivo moguće je postići značajno smanjenje kompleksnosti mnogobrojnih baznih stanica. Osim toga, ovim konceptom moguće je značajno redukovati instalacione i eksploatacione troškove, s obzirom da bi se celokupna potrebna oprema mogla zajednički koristiti od strane svih BS.

Ključne prednosti Fi-Wi sistema, u poređenju sa klasičnim bežičnim sistemima uključuju: veoma malo slabljenje kojem podleže RF signal pri prenosu optičkim putem (~0.2 dB/km i 0.5 dB/km, na talasnim dužinama 1550nm i 1300nm, respektivno), ogroman dostupan propusni opseg optičkog vlakna, imunost na RF interferencije, jednostavna instalacija i održavanje (kompleksna i skupa oprema za procesiranje je centralizovana u CO, dok je na strani BS potrebna samo jednostavna oprema), smanjena potrebna snaga za rad BS, kao i mogućnost dinamičke dodele kapaciteta pojedinačnim BS.

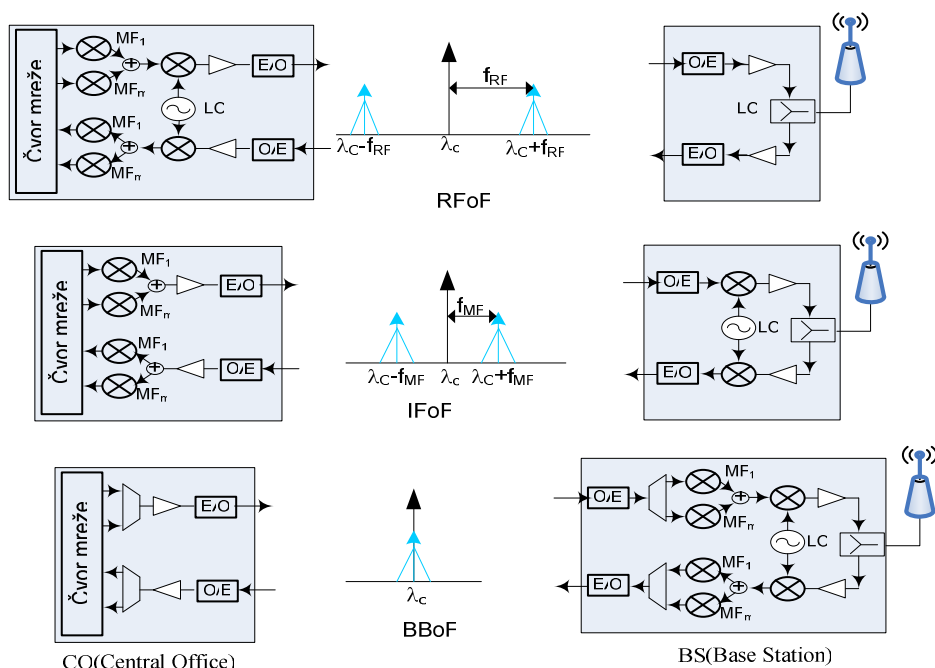
3. Načini prenosa RF signala optičkim putem

U principu, prenos milimetarskih RF signala do baznih stanica optičkim putem moguće je vršiti na jedan od sledeća tri načina [2]:

- ◆ modulacijom optičkog nosioca bežičnim RF signalom (RFoF, RF over Fiber),
- ◆ konvertovanjem RF signala na nižu međufrekvenciju (IFoF, Intermediate Frequency over Fiber) ili
- ◆ u osnovnom opsegu učestanosti (BBoF, Baseband over Fiber).

Najjednostavniji način prenosa bežičnog signala preko optičke mreže je da se milimetarskim RF signalom direktno moduliše optički nosilac (RFoF) na određenoj talasnoj dužini. U takvom konceptu, u baznim stanicama (BS) ne zahteva se korišćenje opreme za translaciju spektra, čime se pojednostavljuje njihova kompleksnost. Kao rezultat modulacije, u okolini optičkog nosioca dobijaju se dva bočna opsega, od kojih je svaki pomeren za učestanost RF nosioca (f_{RF}) od optičkog nosioca (λ_c), kao što je ilustrovano na slici 2. U baznoj stanici, bežični RF signal je moguće rekonstruisati direktnom detekcijom, korišćenjem fotodetektora velikih brzina. Osim u pogledu jednostavne hardverske realizacije baznih stanica (BS), dodatne prednosti ovakvog načina prenosa, uključuju i centralizovanu kontrolu, nezavisnost u pogledu korišćenja bežičnog interfejsa, kao i mogućnost podržavanja bežičnog prenosa u različitim frekvencijskim opsezima. Međutim, jedan od ključnih nedostataka ovakvog načina prenosa predstavlja

neophodnost primene brzih optičkih modulacionih tehnika koje imaju mogućnost da generišu modulirani optički signal milimetarskim modulišućim RF signalom, kao i neophodnost realizacije tehnika brze fotodekcije, za dobijanje mm RF signala iz modulisanog optičkog signala. Osim toga, moguć je i značajan uticaj hromatske disperzije na detektovani mm signal.



Slika 2. Tehnike prenosa milimetarskih RF signala preko optičkog vlakna [2]

Za razliku od RFoF tehnike prenosa, kod IFoF metode mm bežični signal se u CO najpre konvertuje na nižu međufrekvenciju (IF), pre samog prenosa preko optičkog vlakna. Na taj način značajno se smanjuje efekat hromatske disperzije. Pored toga, kod IFoF načina prenosa moguće je koristiti optoelektronsku opremu značajno manjih brzina. Međutim, kod ovakvog načina prenosa povećava se hardverska kompleksnost BS u poređenju sa RFoF. U ovom slučaju zahteva se korišćenje stabilnih lokalnih oscilatora na mm učestanostima, kao i mešače učestanosti velikih brzina za potrebe translacije spektra u baznoj stanici (slika 2). Takođe, ovakav pristup može predstavljati ograničenje kada je neophodno vršiti proširenje ili rekonfiguraciju bežične mreže da bi se podržao rad i na dodatnim mm kanalima ili izvršio prelazak na druge radne frekvencije.

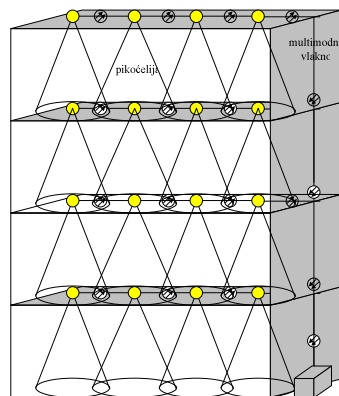
Konačno, kod BBoF načina prenosa, bežični signal se od CO prenosi po optičkom vlaknu kao signal u osnovnom opsegu učestanosti, a zatim se u BS konvertuje njegova frekvencija na zahtevanu učestanost iz mm opsega. Ovakav način prenosa zahteva korišćenje značajne elektronske opreme za procesiranje signala u BS. Međutim, ne zahteva se velika brzina procesiranja. Kao i u slučaju IFoF, efekti hromatske disperzije su značajno smanjeni. Kod ovakvog načina prenosa, BS mora imati inteligentne sposobnosti, odnosno nezavisno od tipa radio interfejsa mora da bude u mogućnosti da u

potpunosti procesira bežične signale, pre slanja povratne informacije ka CO. To zahteva korišćenje značajne hardverske opreme u BS, što drastično povećava njihovu kompleksnost.

Poredeći ove tri tehnologije, sasvim je jasno da se one značajno razlikuju u pogledu zahtevane elektronske RF opreme i opto-elektronskih interfejsa u baznim stanicama. Jedan od ključnih izazova pri implementaciji Fi-Wi pristupnih sistema odnosi se na efikasnu distribuciju mm signala optičkim putem, uz što manju funkcionalnu i hardversku kompleksnost BS. Među navedenim tehnikama, RFoF obezbeđuje najmanju moguću kompleksnost baznih stanica. Međutim, takav način prenosa zahteva rešavanje brojnih i izazovnih problema, kao npr: uticaj hromatske disperzije, problem spektralne efikasnosti, problem modulacije optičkog nosioca milimetarskim talasom, zahtevani optički interfejsi (izvori) u BS i dr, a koji mogu značajno degradirati sveukupne performanse sistema.

3. Primene Fi-Wi sistema

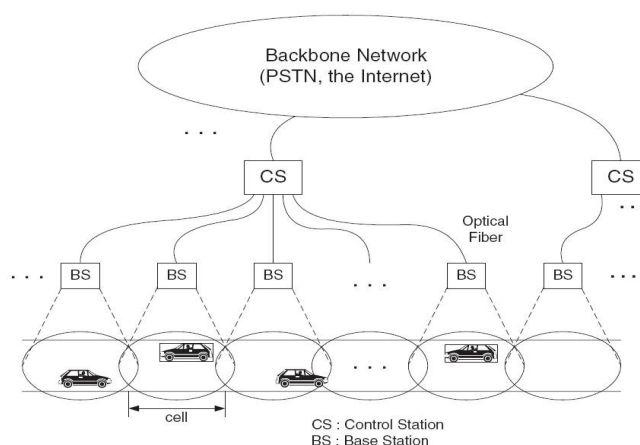
Očekuje se da će zbog pogodnosti koje pružaju, optičko-bežični sistemi imati izuzetno važnu ulogu u budućim heterogenim mrežama za pristup. Jedna od najvažnijih primena ove tehnologije biće u *indoor* okruženju, za širokopojasno pikoćelijsko pokrivanje unutrašnjosti objekata (slika 3). Značajan broj istraživanja sproveden je u domenu dizajniranja pikocelularnih mreža baziranih na optičko-bežičnoj infrastrukturi za distribuciju bežičnih signala unutar objekata [8,9]. Zahvaljujući fleksibilnoj mogućnosti smanjivanja veličine ćelije i ograničavanja broja korisnika po ćeliji, Fi-Wi tehnologija je sposobna da omogući veoma velike binarne protoke po korisniku, posebno u zgradama sa velikom gustinom korisnika. Unutar objekata se zbog relativno kratkih rastojanja na kojima se vrši prenos RF signala do baznih stanica, mogu koristiti i multimodna optička vlakna.



Slika 3. Pikoćelijsko pokrivanje unutar objekata

Osim za *indoor* okruženja, značajne primene Fi-Wi tehnologije očekuju se i u otvorenim zonama uz primenu mikroćelijskog koncepta pokrivanja. Jedna od potencijalnih Fi-Wi primena je za potrebe realizacije komunikacionih sistema za vozila na autoputevima, što je poznato pod nazivom RVC (Road Vehicle Communications)[10]. Osnovna funkcionalna arhitektura jedne RVC mreže prikazana je na slici 4. Na slici se vidi da je

centralna stanica (CS) povezana sa velikim brojem baznih stanica korišćenjem optičkih vlakana kako bi se obezbedili veći binarni protoci, a bazne stanice (BS) su raspoređene duž putnog pravca kako bi omogućile komunikaciju sa vozilima. Svaka bazna stanica ima jedinstveno pokrivanje signalom u okviru svoje ćelije. Ovo je pojednostavljeni prikaz koji podrazumeva jednodimenzioni put uz pretpostavku da je pravac kretanja vozila poznat centralnoj stanici i da je moguće njegovo jednostavno određivanje za vreme kretanja mobilne stanice (MH). Centralna stanica je povezana sa eksternim mrežama koje čine okosnicu ovog sistema, kao što su PSTN (*Public Switch Telephone Network*) ili Internet.



Slika 4. Funkcionalna arhitektura RVC mreže

Svaka bazna stanica pokriva određeno područje (ćeliju) uz postojanje malog područja preklapanja između dve susedne ćelije. Koriste se milimetarski talasi iz opsega 36 GHz ili 60 GHz. Veličina ćelije je mala, reda nekoliko desetina metara. Za *downlink* prenos (od CS ka MH) korisnički podaci prvo modulišu radio (RF) nosilac, koji nakon toga moduliše optički izvor korišćenjem eksternog optičkog modulatora (EOM) Ovaj signal se zatim optičkim vlaknom prenosi do bazne stanice gde se zatim vrši konverzija, tj. optički signal se pretvara u bežični signal odnosno radio talase koji se emituju sa bazne stanice. U *uplink* smeru (od MH do CS) vrši se obrnut proces. Bežični signal koji je primljen na baznoj stanici se pretvara u optički signal modulacijom odgovarajućeg svetlosnog izvora nakon čega se optičkim vlaknom prenosi do centralne stanice gde se u fotodetektoru (PD) signal najpre demoduliše i konvertuje u elektronski koji se nakon toga u centralnoj stanici obrađuje i pretvara u korisničke podatke. U okviru ovakve arhitekture, centralna stanica može imati onoliko primopredajnika (TRX) koliko ima baznih stanica i svaki od primopredajnika se sastoji od laser diode (LD) koja se koristi za *uplink* i fotodetektora koji se koristi za *downlink* i modema koji šalje i prima podatke putem radio talasa. Takođe koriste se i odgovarajući filtri i pojačavači, ali sama bazna stanica nema mogućnost da vrši obradu podataka već ih samo usmerava i prosleđuje. Radi realizacije funkcije hendovera, sve bazne stanice (BS) podeljene su u grupe, pri čemu se zona servisa koju pokriva jedna grupa BS naziva „virtuelna ćelijska zona“ (VCZ). Svakoj VCZ zoni je dodeljena grupa frekvencija koja se koristi u toj zoni i koja se mora razlikovati od one koja se koristi u susednoj zoni kako bi se izbegla ko-kanalna

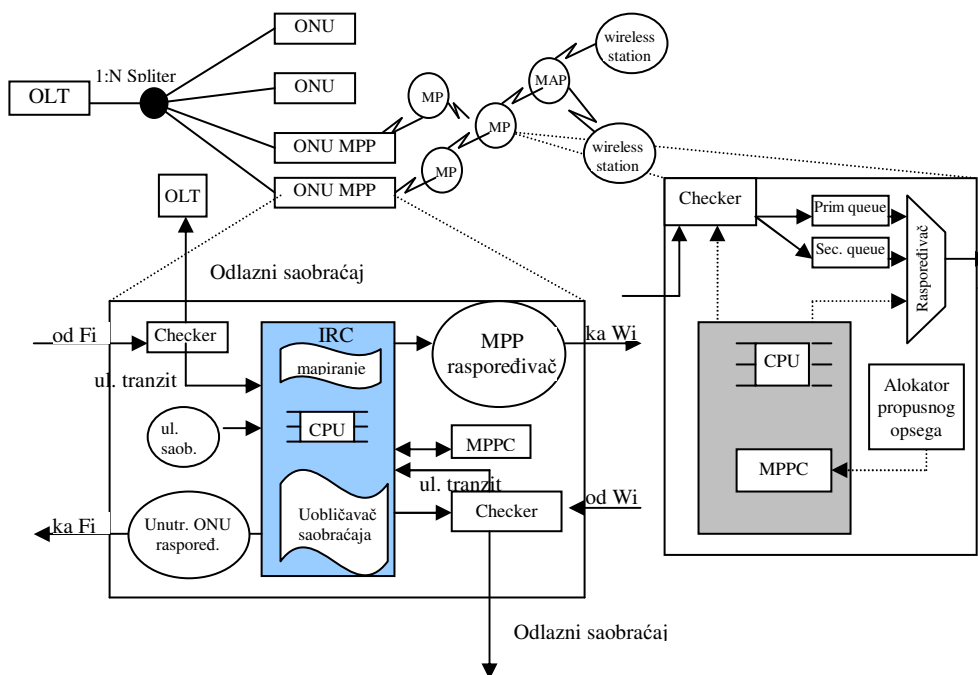
interferencija. Zbog toga, vozilo koje se kreće unutar jedne VCZ zone ne mora da menja frekvenciju na kojoj ostvaruje vezu. Svoju frekvenciju menja tek kada uđe u susednu VCZ zonu. U navedenoj RVC arhitekturi sistema mogu se koristiti tri tipa handover-a:

- ◆ Intra-VCZ handover – To je handover između susjednih baznih stanica koje pripadaju istoj VCZ zoni,
- ◆ Inter-VCZ handover – To je handover između susjednih baznih stanica koje pripadaju različitim VCZ zonama,
- ◆ Inter-CS handover – To je handover između susjednih baznih stanica koje kontrolišu različite centralne stanice.

Za brzine kretanja vozila od 100km/h, zona preklapanja baznih stanica od svega nekoliko metara je dovoljna u većini praktičnih slučajeva.

4. Integracija naredne generacije WLAN i EPON baziranih mreža

U budućnosti se očekuje da će Fi-Wi tehnologija koezistirati sa drugim optičkim pristupnim tehnologijama omogućavajući na taj način spajanje/integraciju unutar postojeće infrastrukture i obezbeđenje transparentnosti u udaljenim čvorovima mreže za pristup.



Slika 5. Arhitektura mreže i struktura čvorova integrisane FiWi mreže baziranoj na WMN i EPON [14]

Brojna istraživanja u svetu imala su cilj da demonstriraju mogućnost integracije različitih bežičnih standarda, uključujući 3G, Wi-Fi i WiMax, sa PON tehnologijom u okviru budućih Fi-Wi sistema [11,12,13]. U nastavku će biti ukratko opisan predlog jednog takvog koncepta, predloženog u [14]. Na slici 5 prikazan je predloženi koncept integracije WLAN bežične *mesh* mreže (WMN) i pasivne optičke mreže zasnovane na EPON standardu.

ONU (Optical Network Unit) predstavlja konvencionalni EPON ONU. Neki od ONU-a su nadograđeni sa MPP (Mesh Portal Point) koji predstavlja interfejs ka WMN. Nadogradnja ONU-a sa bežičnom opremom mora biti izvedena po *pay-as-you-grow* principu. U integrisanoj FiWi mreži, ONU MPP i MP (Mesh Point) imaju ključne uloge. Jedan integrisani ONU MPP čvor sadrži četiri glavna modula: unutrašnji-ONU raspoređivač (*scheduler*), MPP raspoređivač, integrisani kontroler protoka (IRC, Integrated Rate Controller) i MPP kontroler (MPPC). Unutrašnji-ONU i MPP raspoređivači se koriste da prenose lokalni i tranzitni saobraćaj ka EPON i WMN, respektivno. Ulazni i izlazni saobraćaj označavaju saobraćaj generisan od strane ONU i upućen ka ONU, respektivno. IRC ima ključnu ulogu u integraciji ONU i MPP. Obuhvata jedinicu za mapiranje klase saobraćaja, centralnu procesorsku jedinicu (CPU) i jedinicu za uobličavanje saobraćaja. Koristi se za integrisanje obe tehnologije koje zajednički vrše optimizaciju unutrašnjeg-ONU i MPP raspoređivača. Jedinica za mapiranje klase saobraćaja dvosmerno prevodi različite EPON i bežične EDCA/MDA klase saobraćaja. U EPON, ONU koristi prioritizaciju redova definisanih u IEEE 802.1D da podrži sledećih sedam tipova saobraćaja: upravljački, govor, video, kontrolisani, *excellent effort*, *best effort* i *background* saobraćaj.

Jedinica za uobličavanje saobraćaja proverava opterećenje svakog raspoređivača i obavlja uobličavanje saobraćaja i hijerarhijsku agregaciju/deagregaciju saobraćaja. Uloga CPU je dvostruka: sinhronizacija svih operativnih procesa različitih modula IRC-a, uključujući menadžment alarma, monitoring i dinamičko podešavanje uobličavača i raspoređivača saobraćaja da bi se optimizovala isporuka paketa zasnovana na QoS. Osim toga, CPU nadgleda dolazni saobraćaj od optičkih i bežičnih segmenata i vrši sinhronizaciju raspoređivača koji se bazira na informacijama monitoringa saobraćaja. Na primer, u slučaju zagušenja bežične mreže, CPU generiše poruku kontrole zagušenja i šalje je predajniku MP da prilagodi opterećenje. MPPC je odgovoran za upravljanje dolaznim i odlaznim bežičnim saobraćajem, pored uspostavljanja i nadgledanja bežičnih linkova. Struktura bežičnog MP čvora obuhvata četiri osnovna modula: MP raspoređivač, MP kontroler (MPC), modul za alokaciju propusnog opsega i CPU koji se koristi za nadgledanje pomenutih komponenti.

5. Zaključak

Hibridna optičko-bežična tehnologija kombinuje prednosti malog slabljenja i velikog propusnog opsega optičkog vlakna sa jednostavnošću instalacije i širokim opegom koji je raspoloživ u mm delu RF spektra za bežični prenos signala u poslednjim metrima do korisnika. Ovakva solucija pokazala se kao efikasna varijanta za pružanje fiksnih širokopojasnih bežičnih servisa, koji zahtevaju ultra-velike brzine prenosa i mala kašnjenja, posebno u *indoor* okruženjima. Osnovni tehnički izazovi i problemi koje je

neophodno rešiti za omogućavanje prenosa mm bežičnih signala optičkim vlaknom odnose se na nisku efikasnost opto-elektronske konverzije, smanjivanje efekata hromatske disperzije, kao i degradacija usled nelinearnih efekata na optičkom linku. U ovom radu predstavljeni su osnovni koncepti Fi-Wi sistema uključujući potencijalne varijante njihove realizacije. Takođe, objašnjene su osnovne prednosti i primene Fi-Wi sistema, i prikazano je predloženo rešenje integrisane Fi-Wi tehnologije koje je implementirano preko postojeće optičke infrastrukture.

Zahvalnica

Ovo rad je deo istraživanja u okviru projekta TR32025 Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije.

Literatura

- [1] N. Ghazisaidi, C. M. Assi, and M. Maier: "Fiber-Wireless (FiWi) Access Networks: A Survey," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 2, pp. 160–67, 2009.
- [2] C. Lim *et al.*, "Fiber-Wireless Networks and Subsystem Technologies", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no.4, pp. 390-414, Feb. 2010.
- [3] Z. Jia, J. Yu, G. Ellinas, G.-K. Chang: "Key Enabling Technologies for Optical-Wireless Networks: Optical Millimeter-Wave Generation, Wavelength Reuse, and Architecture", *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no.11, pp. 3452–3471, 2007.
- [4] N. Ghazisaidi and M. Maier: "Fiber-Wireless (FiWi) Networks: Challenges and Opportunities," *IEEE Network*, vol. 25, no. 1, pp. 36–42, 2011.
- [5] M. Maier, N. Ghazisaidi, and M. Reisslein: "The Audacity of Fiber-Wireless (FiWi) Networks (Invited Paper)", *Proc. ICST Int'l. Conf. Access Networks*, Las Vegas, NV, pp. 1–20, 2008.
- [6] X. Wang and A. Lim: "IEEE 802.11s Wireless Mesh Networks Networks: Framework and Challenges," *Ad Hoc Networks*, vol. 6, no. 6, pp. 970–84, 2008.
- [7] G. Shen, R. S. Tucker, and C. J. Chae: "Fixed Mobile Convergence Architectures for Broadband Access: Integration of EPON and WiMAX," *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 8, pp. 44–50, 2007.
- [8] C. Lethein *et al.*, "Potentials of radio over multimode fiber systems for the in-buildings coverage of mobile and wireless LAN applications", *IEEE Photonic Techn. Letter*, vol. 17, no.12, pp.2793-2795, 2005
- [9] M. Sauer, A. Kobayakov and J. George, "Radio over Fiber for pico-cellular network architectures," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no.11, pp. 3301-3320, Nov 2007
- [10] Hong Bong Kim *et al.*, "A Radio over Fiber Network Architecture for Road Vehicle Communication Systems", *Proceedings of the 6th IEEE Vehicular Technology Conference*, May 2005.
- [11] H. Le Bras, M. Moignard, "Distribution of 3G base stations on passive optical network infrastructure", *Proc. Microwave Photonic*, pp.1-4, 2006
- [12] H. Kosek *et al.*, "All optical demultiplexing of WLAN and cellular CDMA radio signals," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no.6, pp. 1401-1409, Jun 2007.

- [13] P. Chowdhury et al., "Hybrid Wireless-Optical Broadband Access Network WOBAN: Prototype Development and Research Challenges," *IEEE Network*, vol. 23, no. 3, May/June 2009, pp. 41–48
- [14] N. Ghazisaidi and M. Maier: "Hierarchical Frame Aggregation Techniques for Hybrid Fiber-Wireless Access Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 9, pp. 64-73, 2011.

Abstract: *Fiber-wireless (Fi-Wi) networks incorporating DWDM technology for transport mm-wave wireless signals to the remote base stations are widely considered as a realistic solution for fixed broadband wireless access. The advantage of bimodal Fi-Wi systems is that they can enjoy the strengths of both optical and wireless technologies - specifically, the inherently large bandwidth of optical fiber and the large, unused bandwidth in the mm-wave wireless spectrum. For this reason, a hybrid system has the potential to provide very high data transmission rates with minimal time delay.*

Keywords: *optical networks, wireless millimeter wave signal, fiber-wireless integration*

HIBRID FIBER WIRELESS NEXT GENERATION NETWORKS

Goran Marković and Valentina Radojičić