

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Poslijediplomski doktorski studij Elektrotehnike i informacijske tehnologije

**TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA HIBRIDNIH  
OPTIČKO-BEŽIČNIH MREŽA**

---

Kvalifikacijski ispit

**Damir Brešković**

**Srpanj, 2015.**

## Sadržaj

1.	UVOD .....	3
2.	ELEMENTI HIBRIDNE OPTIČKO-BEŽIČNE ARHITEKTURE.....	5
2.1	Optički segment.....	5
2.2	Bežični segment .....	10
2.2.1	Bežične lokalne pristupne mreže.....	10
2.2.2	LTE mobilne mreže 4. generacije .....	14
2.2.3	Bežične isprepletene mreže .....	17
3.	PRIMJERI ARHITEKTURA HIBRIDNIH OPTIČKO-BEŽIČNIH MREŽA .....	20
3.1	RoF i R&F mreže .....	21
3.2	Mobilne arhitekture .....	25
3.3	Bežične mreže bazirane na WiFi tehnologiji.....	26
4.	OPTIMIZIRANO PLANIRANJE HIBRIDNE OPTIČKO-BEŽIČNE MREŽE .....	32
4.1	Optimalno planiranje položaja ONU uređaja .....	32
4.2	Optimalno planiranje PON mreže .....	35
4.3	Optimizirano planiranje bežičnog segmenta mreže.....	39
4.3.1	Optimizirano planiranje heterogenih bežičnih mreža.....	39
4.3.2	Optimizirano planiranje isprepletenih bežičnih mreža .....	44
4.3.3	Optimizirano planiranje bežičnih lokalnih mreža .....	46
5.	TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA HIBRIDNIH OPTIČKO-BEŽIČNIH MREŽA .....	48
5.1	Tehno-ekonomska analiza optičkog segmenta hibridne mreže .....	49
5.2	Tehno-ekonomska analiza bežičnog segmenta hibridne mreže .....	52
5.2.1	LTE mobilne mreže.....	52
5.2.2	Bežične lokalne pristupne mreže.....	55
5.2.3	WiFi mreže .....	56
5.3	Kapitalni i operativni troškovi bakrene xDSL pristupne mreže .....	57
5.4	Usporedba FTTC/VDSL pristupa s hibridnom optičko-bežičnom arhitekturom .....	58
5.4.1	Hibridne mreže s LTE mrežom u bežičnom segmentu .....	58
5.4.2	Hibridne mreže s WLAN mrežom u bežičnom segmentu.....	60
5.4.3	Pojednostavljivanje izraza temeljeno na stvarnom scenariju .....	61
	ZAKLJUČAK .....	64
	SAŽETAK.....	65
	ABSTRACT .....	65
	LITERATURA.....	66

## 1. UVOD

Dok su u gusto naseljenim područjima telekomunikacijske širokopojasne usluge lako dostupne, u mnogim zemljama ruralna područja još uvijek nemaju mogućnost korištenja najnovijih usluga. Telekomunikacijske pristupne mreže su imaju veliki utjecaj na popravljaju životnog standarda u lokalnim jedinicama kao i na ekonomskom razvoju tog istog ruralnog kraja. Na geografski izoliranim područjima poput otoka ili ruralnih naselja dovođenje optičke mreže je poprilično skupo, stoga, teško je očekivati od pružatelja usluga velike investicije za malo potencijalnih korisnika. Bežične mreže predstavljaju ekonomičniji pristup dovođenja širokopojasnih usluga u ruralna područja, a uz to u modernim telekomunikacijama jedna od najvažnijih značajki je upravo mobilnost korisnika. S druge strane najveći nedostatak bežičnih mreža su dostupna propusnost (*bandwidth*) i područje pokrivanja. Dakle, konvergencija optičkog i bežičnog pristupa se nameće kao najbolje rješenje za otklanjanje svih navedenih nedostataka ovih dviju mreža te zadovoljavanja samih korisničkih zahtjeva. U udaljenim područjima (udaljenim iz perspektive telekomunikacijske centrale) korisnici najčešće imaju jedino mogućnost klasičnih telefonskih usluga, tj. POTS (eng. *Plain Old Telephone Service*) usluga, dok širokopojasne usluge nisu moguće zbog duljine petlje. Standardnim pristupima dovođenje širokopojasne mreže na udaljenija područja se ostvaruje kroz skraćena petlji, tj. implementacijom FTTC/N arhitekture. Optički kablovi se uvlače od centrale do željenog područja gdje završavaju u telekomunikacijskom kabinetu. Od DSLAM uređaja (unutar spomenutog kabineta) postojeći bakreni kablovi (preko kojeg rade postojeće POTS usluge) se iskorištavaju za priključenje korisnika. Ovaj pristup je vrlo skup, a najveći udio u investicije otpada na trošak građevinskih radova i optičkog kabela. Kao alternativa navedenoj arhitekturi predstavljene su hibridne optičko-bežične mreže [2]. Optički kablovi se u hibridnim mrežama provlače od centrale do željene točke na udaljenom području odakle je moguće istovremeno povezati nekoliko susjednih lokacija bežično. Glavni pristup hibridnih mreža je „bilo kad – bilo gdje“. Međutim i hibridne mreže također imaju nekoliko izazova i ograničenja, ali u nekoliko slučajeva se može zaključiti da su ekonomski isplativije u odnosu na standardni način skraćena petlji.

Hibridne mreže su još uvijek predmet znanstvenih analiza i diskusija, te njihova šira primjena još nije sasvim zaživjela. U literaturi je moguće naći nekoliko termina koji obuhvaćaju problematiku hibridnih mreža kao npr. bežične-optičke širokopojasne pristupne mreže (WOBAN, eng. *Wireless-Optical Broadband Access Networks*) [2], radio preko svjetlovodnog vlakna<sup>1</sup> (RoF, eng. *Radio-over-Fibre*), radio i svjetlovodno vlakno<sup>1</sup> (R&F, eng. *Radio and Fibre*), svjetlovodno-bežična mreža (FiWi, eng. *Fibre-Wireless*) [3], hibridna optičko-bežična pristupna mreža (HOWAN, eng. *Hybrid Optical-Wireless Access Network*), itd... Osim pronalazaženja ekonomičnog rješenja, najveći izazov optičko-bežičnih mreža je integracija protokola MAC sloja koji se koriste u optičkom i bežičnom segmentu (ova tema nije predmet interesa ovog rada) [5].

Kako se hibridne optičko-bežične mreže pokazuju ekonomičnijima na većem području pokrivanja, kada je veći prostor pokriven bežičnom mrežom, značajan dio literature se odnosi

---

<sup>1</sup>R&F i RoF nisu identični pristupi. R&F integrira , a RoF segmentira optički i bežični segment

na WiMAX tehnologiju u bežičnom segmentu, dok su EPON (eng. *Ethernet Passive Optical Network*) ili GPON (eng. *Gigabit Passive Optical Network*) standardi najčešće rješenje za optički segment mreže [3]. PON segment hibridne mreže je klasični TDM (eng. *Time Division Multiplexing*) EPON/GPON, koji se temelji na djelitelju na udaljenom čvoru (eng. *Remote node*, RN), prilikom čega se koristi jedan vremenski dijeljeni svjetlovodni kanal za uzlazni prijenos, a drugi vremenski dijeljeni svjetlovodni kanal za silazni prijenos. Oba prijenosa se odvijaju sa propusnošću od 1 Gb/s. Pošto WiMAX mreže nemaju široku primjenu u Hrvatskoj u ovom radu kao rješenja za bežični segment predstavljene su LTE (eng. *Long Term Evolution*) mreže 4. generacije i bežične lokalne pristupne mreže (eng. *Wireless Local Area Network - WLAN*). Buduće optičko-bežične pristupne mreže (eng. *Fiber-Wireless - FiWi*) će imati potrebe za PON mrežama nove generacije (1G-EPON/10G-EPON), te WLAN tehnologijama za postizanje željene propusnosti (eng. *Bandwidth*) [7].

U drugom odjeljku ovog rada dan je uvid u elemente hibridne mreže, tj. u svaki pojedinačni segment: optički i bežični. Svaki taj segment razmatran je neovisno o drugom, te predstavlja uvod u hibridne optičko-bežične mreže. Uočljivo je kako je u optičkom segmentu jedina alternativa EPON/GPON standard dok u bežičnom segmentu imamo više alternativa poput WiFi mreža, isprepletenih mreža, WLAN mreža, itd...

U trećem odjeljku je dan uvid u dva najznačajnija tehnološka pristupa hibridne optičko-bežične mreže: RoF i R&F [1]. Razlika između navedenih modela je u načinu prijenosa radio signala. Kod RoF arhitekture radio signal se prenosi preko optičkog kabela, nakon čega prolazi optičko-električnu konverziju (O/E) prije same propagacije preko antene [4]. R&F arhitektura, s druge strane, nudi dulji doseg na način da segmentira samu topologiju na optički i bežični dio koristeći dva međusobno neovisna MAC protokola, za svaki segment posebno. Na temelju dva navedena pristupa prikazane su i primjeri nekoliko već razrađenih arhitektura hibridnih mreža od kojih su neke planirane za posebne namjene (npr. kada se jedan od korisnika nalazi u vlaku).

Četvrti odjeljak daje uvid u moguća optimiziranja GPON mreža te različitih bežičnih mreža (WLAN, LTE, WMN, itd...) kao osnovnih elemenata optičko-bežične arhitekture. Posljedica istraživanja optimiziranja je da se na temelju tih predloženih modela može izgraditi jedan, globalni model optimiziranja hibridne optičko-bežične mreže, kojim bi se, opet, potvrdila tehno-ekonomska opravdanost korištenja hibridne arhitekture u pristupnoj mreži. Optimiziranja prvenstveno obuhvaćaju maksimalno smanjenje elemenata arhitekture zadržavajući pri tom željenu kvalitetu, minimiziranje ukupnih troškova, te vremena prijenosa.

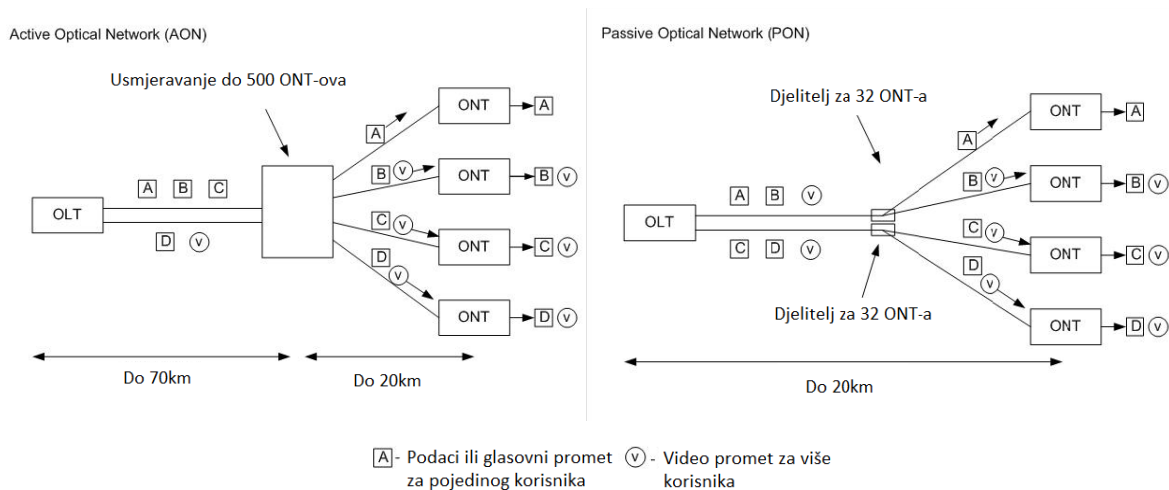
U petom odjeljku je predstavljen model što točnije tehno-ekonomske analize hibridnih optičko-bežičnih mreža. Ukupni procijenjeni troškovi mreže se mogu podijeliti na dva segmenta: optički segment, gdje je za procjenu troška korišten primjer FTTH mreže, te su za bežični segment uzeti procijenjeni troškovi LTE i WLAN mreža [6]. Zbrojeni procijenjeni troškovi obaju segmenata daju ukupni procijenjeni trošak hibridne mreže, te se isti uspoređuje sa procijenjenim troškovima FTTC/VDSL mreže, koja je iskorištena kao referentna opcija skraćanja petlje (alternativa hibridnim optičko-bežičnim mrežama) [6]. Na samome kraju tehno-ekonomski model je primijenjen na jednostavnom scenariju.

## 2. ELEMENTI HIBRIDNE OPTIČKO-BEŽIČNE ARHITEKTURE

Hibridne optičko-bežične mreže se dijele na dva segmenta: na optički i bežični segment. U ovom poglavlju su prikazane najčešće korištene tehnike, pristupi i arhitekture u svakom ovom pojedinom segmentu. Hibridne mreže upravo nastaju spajanjem ovih dvaju segmenata, te također podrazumijevaju da svaki segment preuzme najbolje karakteristike arhitekture koje su dosad razvijene u optičkim i bežičnim mrežama.

### 2.1 Optički segment

Tri osnovna tipa arhitekture optičke pristupne mreže su *point-to-point*, aktivna zvjezdasta arhitektura te pasivna zvjezdasta arhitektura [3]. *Point-to-point* arhitektura pretpostavlja dodijeljenu nit po korisniku od centrale do same korisničke lokacije. Na ovaj način maksimalno je omogućena sigurnost komunikacije te relativno jednostavno upravljanje korisničkim uslugama, međutim glavni nedostatak ovakve arhitekture je neekonomično korištenje niti. Sam kapacitet niti u svjetlovodnim kablovima se značajno troši, a dostupna propusnost pojedine niti je rijetko kad u potpunosti iskorištena. Zvjezdasta arhitektura upravo rješava problem neekonomičnog trošenja niti *point-to-point* pristupa u pristupnoj mreži na način da jedan svjetlovodni kabel se uvlači od centrale sve do udaljenog čvora odakle se jedna nit dijeli na više niti, tj. omogućava priključenje većeg broja korisnika preko jedne niti. U ovisnosti kakva vrsta opreme se koristi za dijeljenje signala u udaljenom čvoru razlikuju se aktivna i pasivna zvjezdasta arhitektura. Aktivna arhitektura podrazumijeva korištenje aktivnih uređaja kojima je potrebno napajanje (npr. preklopnik) za dijeljenje silaznog signala, obradu signala i sl. Pasivna arhitektura naravno podrazumijeva korištenje pasivne opreme u udaljenom čvoru, kao npr. djelitelja, te se na taj način značajno smanjuju troškovi kapitalnih ulaganja (*CAPEX*) i održavanja (*OPEX*). Silazni promet sa zajedničke niti izlazi iz svih portova djelitelja (tzv. *broadcast* promet), a na samoj korisničkoj opremi je da eliminira ostale podatke te samo „izvuče“ dijelove prometa koji se tiču konkretnog korisnika. Djelitelji su najčešće izrađeni sa omjernom ulaznih-izlaznih portova kao 1:32 ili 1:64. Mreže koje koriste pasivne elemente u svojoj arhitekturi za dijeljenje signala se općenito zovu pasivne optičke mreže – PON (eng. *Passive Optical Network*) (slika 1).



Slika 1. Usporedba aktivne i pasivne optičke pristupne mreže

PON mreže karakteriziraju mnoga pozitivna svojstva poput nepostojanja problema elektromagnetske interferencije, smanjenja potrošnje napajanja, te činjenice da nikakva aktivna oprema kao i baterije nisu potrebne. Na rad pasivnih djelatnika (eng. *Splitter*) ne utječu brzina prijenosa, način modulacije signala i korišteni protokoli. U PON mrežama postoje različite mogućnosti balansiranja opterećenja (eng. *Load balancing*), te se samim time značajno smanjuju kolizije i kašnjenja. Jedan od mehanizama sprečavanja kolizije u silaznom prometu je uporaba TDM (eng. *Time Division Multiplexing*) multipleksiranja na strani centrale, dok u uzlaznom prometu kolizije su potpuno izbjegnute korištenjem odgovarajućih MAC protokola. MAC protokoli koji definiraju pristup zajedničkom mediju se mogu podijeliti u četiri osnovne kategorije: u vremenskoj domeni TDMA (eng. *Time Division Multiple Access*), u svjetlovodnoj domeni WDMA (eng. *Wavelength Division Multiple Access*), višestruki pristup podnosilaca SCMA (eng. *Subcarrier Multiple Access*), optički višestruki pristup s kodnom podjelom - OCDMA (eng. *Optical Code Division Multiple Access*). TDMA je trenutno najrasprostranjenija kategorija MAC protokola, dok je WDMA najizgledniji kandidat za buduće PON mreže. Kao standard TDMA PON mreže izdvajaju se EPON i GPON.

Osnovna razlika između ova dva standarda je što EPON koristi Ethernet okvire za prijenos podataka [8]. Tijekom prijenosa Ethernet okviri se ne mogu segmentirati, tako da je njihov prijenos odgođen ako se ne mogu prenijeti unutar jednog vremenskog odsječka. U EPON arhitekturi koriste se dva krajnja uređaja: OLT (eng. *Optical Line Termination*) na strani centrale, čija funkcija je prilagođavanje podatkovnih okvira iz transmisije za pristupnu mrežu do korisnika, te ONU (eng. *Optical Network Unit*) i ONT (eng. *Optical Network Terminal*) na korisničkoj strani, koji ima funkciju opto/električne (O/E) pretvorbe signala. Između OLT-a i ONU-a je djelatnik koji se nalazi bliže korisničkim lokacijama. Moguće je i kaskadno spajanje više djelatnika, međutim tada treba pripaziti da se ne prijeđe maksimalna dozvoljena granica ukupnog gušenja snage optičkog signala. Na podatkovnom sloju MAC protokol koji se u EPON arhitekturi koristi za pristup zajedničkom mediju je MPCP (eng. *Multi-point Control Protocol*). Jedna od važnijih karakteristika EPON mreže je i dinamička dodjela propusnog

pojasa (DBA – eng. *Dynamic Bandwidth Allocation*), koja je znatno olakšana korištenjem MPCP protokola [3]. MPCP protokol koristi dvije poruke. REPORT porukom pojedini ONU definira potrebni propusni pojas OLT uređaju, tako što taj podatak predstavlja red podataka koji čeka na samom ONU uređaju. Nakon što odradi DBA algoritam OLT uređaj preko GATE poruke osigurava željeni kapacitet u prijenosu. Postoje dva tipa uređivanja redoslijeda prijenosa podataka: inter-ONU i intra-ONU uređivanje. Inter-ONU uređivanje se odnosi na dodjeljivanje redoslijeda prometa između više ONU uređaja istovremeno, dok intra-ONU određuje redoslijed prijenosa različitih vrsta podataka unutar jednog ONU uređaja. OLT uređaj može raditi ili u inter i intra-ONU modu ili samo u inter-ONU modu (dok sam ONU uređaj provodi intra-ONU uređivanje). S obzirom na brzinu prijenosa EPON arhitektura može biti izvedena s brzinom od 1Gb/s (G-EPON) ili 10 Gb/s (10G-EPON).

GPON standard, s druge strane, koristi GEM (eng. *Generic Encapsulation Method*) metodu enkapsulacije podataka, što mu omogućava prijenos Ethernet okvira, ali i ATM (eng. *Asynchronous Transfer Mode*), IP (eng. *Internet Protocol*) i okvira drugih protokola [8]. GEM metodom osigurano je segmentiranje i ponovno sastavljanje okvira tijekom prijenosa. Zaglavlje GEM je veličine od samo 5 bajta. GPON terminologija također koristi pojmove poput OLT i ONU/ONT, dok se uvodi i pojam ODN (eng. *Optical Distribution Network*), koja u pravilu integrira niti i pasivni optički djelatelj. Kao i kod EPON-a ONU šalje zahtjev za prijenos (*Status Reporting* - SR mod rada), dok OLT dodjeljuje vremenski odsječak i propusni pojas za ONU. Na razini MAC sloja prijenosna jedinica kod GPON-a je T-CONT (eng. *Transmission Container*) [8]. OLT uređaj dodjeljuje pojedinom ONU uređaju jedan ili više T-CONT-ova, te se na taj način pojedine vrste usluga mogu grupirati na jedan T-CONT. Na ovaj način je omogućeno i diferenciranje usluga. Pojedini ONU uređaj preko GEM okvira komunicira sa OLT uređajem te ga izvješćuje o potrebnom propusnom pojasu kao i o veličini reda podataka na samom uređaju. OLT na temelju tih podataka omogućava što efikasniji prijenos za taj ONU uređaj. U ovisnosti na mogućí propusni pojas moguće je doći do standarda 10GPON (XG-PON1 asimetrična verzija 10GPON-a, te XG-PON2 simetrična verzija). GPON se pokazao kao uspješan standard za prijenose u realnom vremenu (zbog mogućnosti segmentacije - npr. T1/E1 veze...), dok se EPON pokazao boljim za čiste podatkovne aplikacije (npr. Internet). U usporedbi ovih standarda prema nekim istraživanjima GPON ima prednost u odnosu na EPON [8]. Osnovne razlike između EPON i GPON su prikazane u tablici 1.

Tablica 1. Usporedba EPON i GPON

		<b>G.984 GPON</b>	<b>802.3 ah EPON</b>
<b>MAC sloj</b>	<b>Usluge</b>	Ethernet, TDM , POTS ...	Ethernet podaci
	<b>Tip okvira</b>	GEM okvir	Ethernet okvir
<b>Fizički sloj</b>	<b>Doseg</b>	10/20 – 60 km	10/20 km
	<b>Faktor dijeljenja</b>	1:64 (optimal) – 1:128	1:64 max
	<b>Uzlazni promet</b>	155 Mb/s, 622 Mb/s, 1.25 Gb/s	1.25 Gb/s
	<b>Silazni promet</b>	1.25 Gb/s, 2.5 Gb/s	1.25 Gb/s
	<b>Propusni pojas</b>	Kao i u polju iznad (NRZ kodiranje)	1 Gb/s (8B10B kodiranje)
	<b>Optički gubici</b>	15/20/25 dB	15/20 dB
	<b>Valna duljina</b>	Silazni smjer: 1480 - 1500 nm Uzlazni: 1260 - 1360 nm	Silazni smjer: 1480 - 1500 nm Uzlazni: 1260 - 1360 nm
<b>Učinkovitost</b>	95%	89%	

Pristupne mreže nove generacije (NGOA, eng. *Next Generation Optical Access*) imaju za cilj smanjenje troškova održavanja mreže (OPEX), ali istovremeno moraju osigurati visoku kvalitetu, dostupnost (veći doseg), sigurnost, te značajno povećan propusni pojas po korisniku [9]. Kao konačan cilj trebale bi omogućiti gornju granicu brzine od 1Gb/s, dok bi brzina od 0,3 Gbit/s bila zagarantirana, te također omogućiti veću simetriju u uzlaznom i silaznom prometu. NGOA podrazumijeva spajanje pristupne i agregacijske mreže u pojednostavljenu mrežu, čime bi se omogućilo lakše upravljanje mrežom, kao i smanjenje troškova održavanja. Nadogradnja mreže na noviju generaciju zahtijevala bi veći doseg do 100 km, te veću koncentraciju korisnika po niti (npr. 1024), uz efektivno izvedenu redundanciju i sigurnost (tzv. LR-PON mreže – *Long Reach – PON*) [9]. Od TDM-PON arhitektura standardi 10G-EPON i 10G-GPON predstavljaju koncept NGOA, koji se još nazivaju NG-PON (eng. *Next generation PON*) [3]. U zadnje vrijeme sve se više razvija koncept koji bi integrirao 10G-EPON i 10G-GPON, čime bi se ostvarila pokrivenost 10G PON-a po cijelom svijetu [9].

10G-EPON koristi PtMP (eng. *Point-to-multipoint*) topologiju, koja može biti izvedena u 2 moda: simetričnom (uzlazni i silazni promet od 10Gb/s) ili asimetrični (10Gb/s silazni, a 1Gb/s za uzlazni promet) [9]. Maksimalan omjer pogrešnih bitova (eng. *Bit error ratio – BER*) mora biti bolji od 10<sup>-12</sup>. Dozvoljeno dijeljenje je 1:16 ili 1:32, a doseg barem 20 km. 10G-EPON je kompatibilan sa svim prijašnjim EPON standardima. Na razini 2. sloja OSI modela (*Data Link Layer*), MPCP protokol je u većini parametara isti kao i u svim EPON varijantama [8, 10]. 10G-GPON standard razvijen je s ciljem povećanja performansi GPON standarda, ali u isto vrijeme mora biti kompatibilan sa starijim verzijama. Propusni pojas je povećan na 10 Gb/s, a prijenos Ethernet okvira optimiziran [8].



NG-PON tehnologije mogu biti podijeljene na dvije kategorije [3]: NG-PON1 i NG-PON2. NG-PON1 – predstavlja evolucijsku promjenu u odnosu na trenutne PON mreže na način da je u većini elemenata kompatibilan sa starijim verzijama [3]. Na taj način omogućava se postepen prelazak na mreže nove generacije. Jedno od obećavajućih NG-PON1 rješenja je XGPON1, koji je asimetrična verzija 10G-GPON-a gdje je brzina silaznog prometa 10 Gb/s, dok je brzina uzlaznog prometa 2,5 Gb/s. XGPON2 je simetrična verzija 10G-GPON-a brzine 10 Gb/s. Za povećanje doseg mreže (tzv. LR-PON mreže) potrebna je ugradnja pojačala u distribucijskom dijelu mreže (strogo gledano to je onda AON mreža (eng. *Active Optical Network*, a ne više PON). NG-PON1 standard može podržati i WDM tehnologiju na način da se koriste ONU uređaji koji mogu istovremeno raditi na više valnih duljina (*colorless ONU*).

NG-PON2 – predstavlja revolucijsku promjenu u odnosu na trenutne PON mreže tako što u većem dijelu nije kompatibilan sa starijim verzijama XG-PON mreža [3]. NG-PON2 bi trebao biti rješenje za omogućavanje usluga na brzinama do 40 Gb/s (preko 1Gb/s po korisniku), koristeći faktor dijeljenja 1:64, omogućiti doseg do 40km, povećati otpornost mreže uslijed mogućih prekida, pojačanu sigurnost mreže, te u konačnici i smanjenje broja centrala baziranih na GPON tehnologiji [11]. NG-PON2 uvodi tehnologije poput DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) i CDM (*Code Division Multiplexing*).

WDM PON umjesto djelatnika u distribucijskoj mreži koristi AWG (eng. *Arrayed-waveguide grating*) rešetku, koja je pasivni uređaj, te ima ulogu selektivnog filtera [3]. Na taj način svaki pojedini ONU uređaj koristi zasebni svjetlovodni kanal, pa MAC protokoli za pristup zajedničkom mediju nisu potrebni. U ovisnosti o broju svjetlovodnih kanala (u ovisnosti o kvaliteti lasera) postoje CWDM (eng. *Coarse WDM*) i DWDM (eng. *Dense WDM*) inačice. U svibnju 2012. *Full Service Access Network* (FSAN) društvo je odredilo TWDM-PON mrežu kao primarnu soluciju za NG-PON2 tip mreža [12]. TWDM-PON mreža kombinira vremensku i svjetlovodnu domenu u pasivnim mrežama, te posjeduje mnogo pozitivnih karakteristika poput statističkog dijeljenja propusnog pojasa (korisnik može fleksibilno koristiti usluge na brzinama od nekoliko Mb/s do 10 Gb/s), te je kompatibilna sa starijim verzijama PON mreža (može koristiti isti djelatnik). TWDM-PON standard može biti izveden u asimetričnoj 40/10 Gb/s i simetričnoj 40 Gb/s verziji. Dozvoljeni gubici asimetrične verzije su 40 dB u silaznom te 38 dB u uzlaznom prometu koji podržavaju faktor dijeljenja do 1:512 sa dosegom od 20km [13]. Simetrična verzija TWDM-PON mreže podržava dozvoljeni budžet gubitaka od 31 dB sa dosegom od 25km i faktorom dijeljenja 1:256 [13]. Obje izvedenice TWDM-PON mreže koriste podesive optičke filtre na ONU uređajima za definiranje silaznog signala, te upravljanje uzlaznog signala.

OCDMA PON je tipična arhitektura u obliku stabla u kojoj pojedini ONU sadrži koder/dekoder sa jedinstvenim i fiksnim kodovima. OCDMA PON arhitektura može koegzistirati sa TDM i WDM PON arhitekturama [3].

OFDMA PON je svojevrsan hibrid između OFDMA i TDMA, na način da se pojedini OFDM pod-nosioci (*sub-carriers*) mogu dinamično dodjeljivati različitim uslugama u različitim vremenskim odsječcima [3]. OLT uređaj odašilje (*broadcast* promet) raspored vremenskih odsječaka i frekvencija za pojedine ONU uređaje. Također, važno je da ti ONU

uređaji mogu raditi na više valnih duljina (*colorless ONU*). Na temelju toga pojedini ONU uređaj zna koji je paket namijenjen za njega prilikom slanja podataka od strane OLT uređaja preko distribucijske mreže.

## 2.2 Bežični segment

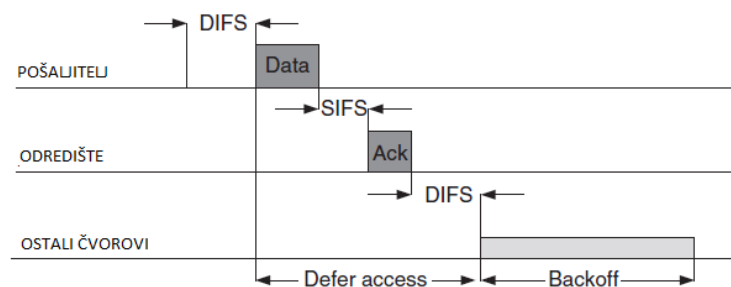
Za razliku od optičkog segmenta hibridne optičko-bežične mreže, gdje je većina solucija bazirana na EPON i GPON pristupu, tehnologije i pristupi koji se nameću kao rješenje za bežični segment hibridne optičko-bežične mreže mogu biti raznoliki. Najčešće obuhvaćaju bežične pristupne mreže WLAN/WiFi (eng. *Wireless Local Area Network/Wireless Fidelity*), bežične isprepletene mreže WMN (eng. *Wireless Meshed Network*) i mobilne mreže (najnovije LTE mreže 4. generacije). U literaturi je često kao pogodno rješenje predstavljen i WiMAX (eng. *Worldwide Interoperability for Microwave Access*) koncept, međutim kako u Republici Hrvatskoj ova tehnologija nije značajnije zastupljena, ista neće biti obuhvaćena ovim radom.

### 2.2.1 Bežične lokalne pristupne mreže

Bežične lokalne mreže, tj. WLAN mreže su bazirane na IEEE 802.11 (a/b/g/n) standardu te omogućuju prijenos različitih podatkovnih usluga. WLAN arhitektura se tipično sastoji od jedne ili više bežičnih stanica (STA) – korisnika, te pristupnih točaka (eng. *Access Points – AP*) koji omogućuju vezu STA sa internetom preko žičane mrežne infrastrukture, tj. distribucijskog sustava (DS) [3]. STA uređaji komuniciraju sa njima pripadajućim AP-ovima koristeći MAC protokole. Fizički sloj 802.11 standard uključuje način prijenosa proširenim spektrom frekvencijskih skokova (eng. *frequency hopping spread spectrum – FHSS*), proširenim spektrom izravnih sekvenci (eng. *Direct sequence spread spectrum – DSSS*) i infracrvenu komunikaciju (eng. *Infrared – IR*) [3]. Različite inačice 802.11 standarda koriste različite tehnike, tako npr. 802.11b koristi brzi DSSS (eng. *High-rate DSSS – HR-DSSS*), dok 802.11g koristi ortogonalno frekvencijsko multipleksiranje (OFDM).

802.11 MAC sloj koristi funkciju distribuirane koordinacije (eng. *Distributed coordination function – DCF*). Princip rada podrazumijeva STA uređaje koji „slušaju“ kanal na kojem komuniciraju i ukoliko je on prazan počinju s komunikacijom. Osnovni problem ovog pristupa je vjerojatnost da u istom trenutku prijenosnom kanalu pokušavaju pristupiti dva uređaja istovremeno što izaziva kolizije. U svrhu toga razvijena su dva pristupna protokola: višestruki pristup sa osluškivanjem nositelja/izbjegavanje kolizija i višestruki pristup sa osluškivanjem nositelja/detekcija kolizija (CSMA/CA i CSMA/CD). U CSMA/CA protokolu izvorišni uređaj sprema okvire spremne za prijenos u međuspremnik, te osluškuje svoj bežični kanal. Ukoliko je isti slobodan u određenom vremenskom trajanju (DCF međuokvirni razmak – DIFS) otpočinje se s prijenosom podataka iz međuspremnika. U suprotnom DCF protokol aktivira *backoff timer* kojim se prijenos odgađa za definirano vrijeme da bi se osiguralo oslobađanje kanala od ostalih uređaja koji mu pristupaju. Ukoliko uređaj primijeti da u

vremenu isticanja *backoff timera* neki drugi uređaj je počeo s prijenosom isti se resetira na početnu vrijednost i proces otpočinje opet ispočetka. Nakon obavljenog prijenosa podataka uređaj pošiljatelj očekuje okvir potvrde (eng. *Acknowledgement frame – ACK*) od strane odredišnog uređaja za potvrdu uspješnog prijenosa. Ukoliko pošiljatelj ne primi ACK okvir u određenom vremenskom periodu čekanja (eng. *Short interframe space – SIFS*), tada ponavlja slanje podataka iz međuspremnika smatrajući da prvi prijenos nije uspješno odrađen. Pošiljatelj će ovaj proces ponavljati nekoliko puta, te ako i nakon tih ponavljanja u definiranom vremenskom roku ne dobije ACK okvir odbacit će te podatke smatrajući da je odredište nedostupno. Ovaj proces se naziva rukovanje (eng. *Handshaking*) (prikazan na slici 2).



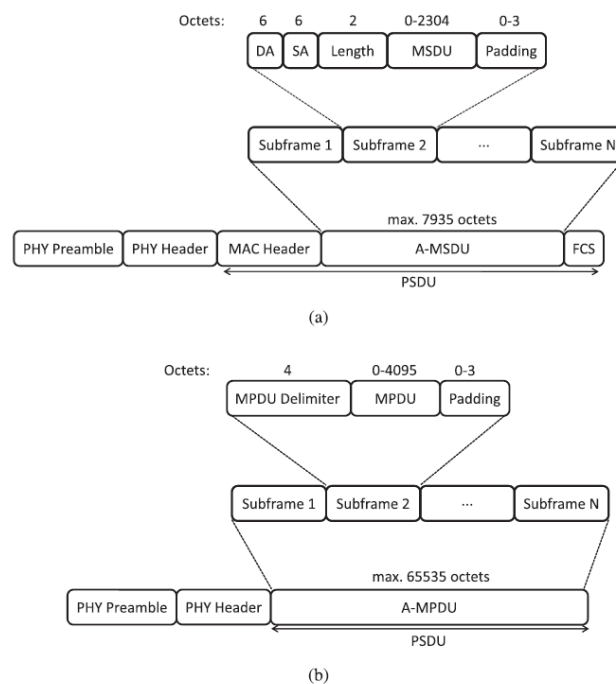
Slika 2. Proces rukovanja (handshaking) CSMA/CA protokola

PCF (eng. *Point coordination function*) tehnika na MAC sloju radi po principu AP-a koji ispituje pojedini STA uređaj za prijenos podataka dijeljenom mediju ili primjenjuje način sličan DCF-u samo što je pristup kanalu upravljan i nadziran od strane AP-a. AP koristi vremenski interval koji je nešto kraći od DIFS-a, a zove se PIFS (eng. *PCF interframe space*). Veličina podataka koji STA uređaj šalje na prijenos je ograničen veličinom WLAN MAC podatkovne jedinice (eng. *MAC service data unit – MSDU*). Za podatke čija je veličina veća od MSDU i dalje je moguć prijenos koristeći RTS/CTS mehanizme. Pošiljatelj šalje RTS (eng. *Request to send*) poruke odredišnom uređaju sa podacima o veličini paketa. Odredišni uređaj odgovara CTS porukom (eng. *Clear to send*) kojom osigurava dovoljno kapaciteta za prijenos željenog paketa.

U odnosu na DCF i PCF koji su *best-effort* mehanizmi, postoje i mehanizmi koji garantiraju kvalitetu usluge, tzv. hibridna funkcija koordinacije - HCF (eng. *Hybrid Coordination Function*) mehanizmi. HCF najčešće koriste bežične mreže bazirane na 802.11e standardu. Da bi se osigurala kvaliteta usluge (QoS – *Quality of service*) u 802.11e standardu razvijena su dva pristupa zajedničkom mediju: EDCA (*Enhanced distributed channel access*) prema kojem STA sa paketom većeg prioriteta čeka nešto kraće od ostalih STA za pristup zajedničkom mediju i HCCA (*HCF-controlled channel access*) koji funkcionira na sličan način kao i PCF koristeći TSPEC okvire za definiranje maksimalnog dozvoljenog kašnjenja, minimalne brzine prijenosa i sličnih karakteristika koji definiraju kvalitetu usluge (QoS) [3].

802.11n WLAN mreže primjenjuju OFDM tehniku i MIMO (eng. *Multiple in – multiple out*) antene na fizičkom sloju, te na taj način omogućuju razne mogućnosti poput prostornog

multipleksiranja, prostorno-vremenskog kodiranja (eng. *Space Time Block Coding – STBC*), itd... Na ovaj način propusni pojasevi su povećani s 20 MHz na 40 MHz spajanjem kanala, što rezultira povećanjem brzine prijenosa na 600Mb/s, te su time stekle naziv WLAN mreže velike propusnosti (eng. *High Throughput WLAN – HT-WLAN*). Jedna od najvećih značajki HT-WLAN pristupa na MAC sloju je agregiranje okvira A-MSDU i A-MPDU [3]. Kod Agregiranih MAC uslužnih podatkovnih jedinica (eng. *Aggregate MAC Service Data Unit – A-MSDU*) pojedini STA spaja više MSDU okvira sa različitim odredišnim adresama u jednu podatkovnu jedinicu MAC protokola - MPDU (eng. *MAC protocol Data Unit*) koju šalje put AP-a (slika 3). Pojedini podokvir se identificira sa oznakom broja prijenosa – TID (eng. *Transmission ID*). Slično i AP može u obrnutom smjeru upakirati više MSDU okvira namijenjenih jednom STA u jedan MPDU okvir. Na razini MPDU okvira je također moguće agregiranje više okvira u jedan MPDU okvir (eng. *Aggregate MAC Protocol Data Unit*) (slika 3). Više MPDU okvira namijenjenih istoj odredišnoj adresi se pakira u jedan okvir uslužnih podatkovnih jedinica fizičkog sloja (eng. *PHY Service Data Unit – PSDU*). Ono što je najvažnije i za A-MPDU i A-MSDU je da je za grupirane okvire potrebno samo jedno PHY zaglavlje [3]. Kod A-MSDU PSDU okvir sadrži jedno MAC zaglavlje i sekvencu provjere okvira (eng. *Frame check sequence – FCS*), za razliku od A-MPDU gdje pojedini MPDU podokvir sadrži vlastito MAC zaglavlje i FCS. Zbog manjeg zaglavlja A-MSDU ima bolju propusnost, međutim u slučaju kanala koji su skloni greškama ta propusnost znatno otpada, pa se A-MPDU smatra robusnijim [3]. Ova dva načina agregiranja okvira podatkovnih jedinica se mogu koristiti odvojeno ili zajedno što se u pojedinim slučajevima pokazalo čak kao i efikasnija solucija [3].



Slika 3. Načini agregiranja okvira u WLAN mrežama nove generacije: a) A-MSDU i b) A-MPDU

HT-WLAN mreže nove generacije uvode i tehnike povećanja efikasnosti brzine prijenosa. Jedna od značajki MAC sloja je i *power save multi-poll* (PSMP) [3]. AP šalje PSMP okvire za ugovaranje rasporeda uzlaznog i silaznog prijenosa za pojedini STA preko UTT (eng. *Uplink Transmission Time*) i DTT (eng. *Downlink Transmission Time*) polja koji definiraju trajanje pojedinog prijenosa [3]. HT-WLAN mreže podupiru i PSMP praskavi način prijenosa (eng. *PSMP burst mode transmission*). PSMP praskavi mod se sastoji od podatkovnih i MTBA (eng. *Multi-TID block acknowledgement*) okvira, gdje pojedini podatkovni okvir može sadržavati više paketa agregiranih preko A-MPDU.

Osim 802.11 a/b/g/n WLAN i HT-WLAN mreža, IEEE grupa za WLAN mreže razvija i WLAN mreže vrlo visoke propusnosti (VHT-WLAN) [3]. VHT-WLAN mreže bi trebale omogućiti prijenos video podataka visoke definicije (HD video). IEEE grupa je oformila dvije grupe: 802.11ac VHTL6 (mreže bi trebale raditi na 6 GHz) i 802.11ad VHT60 (mreže bi trebale raditi na 60 GHz milimetarsko – svjetlovodnom (mm-wave) pojasu). VHT-WLAN mreže su kompatibilne sa prijašnjim verzijama WLAN mreže.

VHTL6 mreže preuzimaju neke od najvažnijih karakteristika 802.11n mreže poput OFDM i MIMO antena, te, također, koriste 264 QAM (eng. *Quadrature Amplitude Modulation*) modulaciju. Moguće je povećati propusni pojas kanala sa 40 MHz na 80 MHz ili 160 MHz čime bi se brzina podataka podigla na 1 Gb/s na 5 GHz pojasu. VHT60 koristi nelicencirani 57-66 GHz frekvencijski pojas što omogućuje brzinu prijenosa od više Gb/s po korisniku. Za ovaj standard potrebne su različite modifikacije MAC i PHY sloja, a koja uključuju modifikacije na MAC sloju za usmjerene antene te brz prijelaz sesija na fizičkom (PHY) sloju. Zbog korištenja 60 GHz frekvencijskog pojasa pojavljuje se problem velike potrošnje energije [3].

Osnovne karakteristike svih standarda IEEE 802.11 specifikacija su dane zbirno u tablici 2.

Tablica 2. Svi standardi IEEE 802.11

802.11 IEEE standardi						
Godina	Standard	Pojas (GHz)	Pojasna širina (MHz)	Modulacija	Napredne antenske tehnologije	Maksimalna brzina prijenosa
1997	802.11	2.4	20	DSSS, FHSS	N/A	2 Mb/s
1999	802.11b	2.4	20	DSSS	N/A	11 Mb/s
1999	802.11a	5	20	OFDM	N/A	54 Mb/s
2003	802.11g	2.4	20	DSSS, OFDM	N/A	54 Mb/s
2009	802.11n	2.4, 5	20, 40	OFDM	MIMO	600 Mb/s
2012	802.11ad	60	2160	SC, OFDM	<i>Beamforming</i>	6.76 Gb/s
2013	802.11ac	5	40, 80, 160	OFDM	MIMO, MU-MIMO	6.93 Gb/s

### 2.2.2 LTE mobilne mreže 4. generacije

LTE (eng. *Long Term Evolution*) predstavlja četvrtu generaciju mobilne mrežne tehnologije za korisnike koji imaju potrebe za brzim bežičnim uslugama [3]. Prema definiciji LTE mreže omogućavaju brzine prijenosa od 300 Mb/s te mogu raditi u vremenskom dupleks modu (eng. *Time Division Duplex – TDD*) i frekvencijskom dupleks modu (eng. *Frequency Division Duplex – FDD*). Propusni pojas se kreće od 5 MHz do 20 MHz. Jedna od najvažnijih karakteristika LTE mreže su samostalno konfiguriranje, te *plug-and-play* osobine. U silaznom radijskom prijenosu LTE mreža upotrebljava se ortogonalno frekvencijsko multipleksiranje, tj. OFDM. Podnosiocima je moguće prilagoditi za pojedinog korisnika kako bi se na taj način podržavalo raznolike korisničke profile. Glavni raspoređivač na baznoj postaji, zvan *enhanced NodeB* (eNB) dinamički kontrolira vremenske i frekvencijske resurse koji se dodjeljuju pojedinom korisniku, te primjenjuje potrebne tehnologije multipleksiranja. Uskopojasni podnosioci te ciklički prefiks omogućavaju radio prijenos koji je otporan na vremensko disperziranje [3]. Na taj način cijena te potrošnja energije mobilnih korisnika opadaju zbog jednostavnijeg procesuiranja signala na primateljskoj strani. U uzlaznom radijskom prijenosu koriste se OFDM multipleksiranje na temelju diskretne Fourierove transformacije (DFT) – SOFDM, te isprepletani frekvencijski višestruki pristup (eng. *Interleaved Frequency Division Multiple Access – IFDMA*). Važne karakteristike LTE tehnologije su i korištenje više-antenskih sustava, tj. MIMO sustav antena, zatim prostorno multipleksiranje, generiranje signala, te raznolikost načina prijenosa. Na fizičkom sloju za pristup dijeljenom mediju upotrebljavaju se napredne inačice TD-SCDMA (eng. *time division-synchronous code division multiple access*) [3].

U LTE mrežama upravljanje i raspoređivanje resursa nadgleda sloj veze (eng. *Link layer*) koji se sastoji od 3 podsloja: podsloja protokola konvergiranja podatkovnih paketa (eng. *Packet Data Convergence Protocol – PDCP*), koji je odgovoran za prikapčanje, kompresiju IP zaglavlja i šifriranje podataka, zatim podsloj upravljanja radijskim linkom (eng. *Radio Link Control – RLC*), koji je odgovoran za segmentiranje i ulančavanje podataka, te, konačno, podsloj upravljanja pristupom medija (eng. *Media Access Control – MAC*), koji je odgovoran za upravljanje i raspoređivanje resursa. U odnosu na mreže treće generacije (3G) protokoli na sloju veze LTE mreža poboljšavaju kvalitetu usluge (QoS) povećanjem pouzdanosti, sigurnosti i integriteta mreže [3]. Zahvaljujući SR mehanizmu (eng. *Sending request*) korisnik preko izvještaja stanja međuspremnika (eng. *Buffer Status Report – BSR*) definira količinu podataka koji se trenutno nalaze u njegovom međuspremniku. Za razliku od starijih generacija mreža gdje su pojedini kanali bili dodjeljivani pojedinim korisnicima za koje su bile definirani pojedini parametri kvalitete usluge, u LTE mrežama svi korisnici dijele silazni i uzlazni kanal dok nadzori pristupa mediju te raspoređivanje u vremensko-frekvencijskoj domeni definiraju kvalitetu usluge i diferencijaciju usluga na uzlaznoj LTE vezi. Nema standardiziranog algoritma za upravljanje i raspoređivanje resursa, međutim svaki takav algoritam na eNB čvoru je odgovoran za zadovoljavanje kvalitete usluge za različite klase prometa. eNB čvor osigurava korisnicima visoke važnosti prednost pristupu uzlaznoj vezi, na temelju korisnikova BSR izvještaja. U silaznom prometu raspoređivač selektira prikladnog korisnika te njemu prikladan radio signal.

MAC i RLC podslojevi koriste HARQ protokol za omogućavanje protokola selektivnog ponavljanja i automatskog ponavljanja (eng. *Automatic Repeat Request*) koji osigurava pouzdan prijenos sa malim kašnjenjem i malim zaglavljem.

3GPP grupa (eng. *3rd Generation Partnership Project*) definira tri moda uštede energije kod mobilnih mreža: aktivni mod, diskontinuirano primanje (DRX) u radio resursnom kontrolnom modu u mirovanju (*RRC<sub>IDLE</sub>*), te, konačno treći mod, DRX u povezanom spavajućem modu. U modovima mirovanja ili spavanja mobilne stanice mogu isključiti svoje predajnike/prijamnike za smanjivanje potrošnje energije. Jedno od glavnih poboljšanja u LTE mrežama je povezivanje korisnika kojima je omogućen DRX na novi eNB dok su u pokretu. U LTE DRX modu korisnik je registriran kroz razvijeni paketni sustav (eng. *Evolved Packet System – EPS*) – upravljanje mobilnosti (eng. *Mobility management*), tj. EMM. Registrirani korisnik može biti odabran za silazni link, dok mora tražiti RRC vezu za pristup kanalu za prijenos na uzlaznoj vezi. Postoje i drugi mehanizmi upravljanja energijom unutar DRX okvira, poput onih koji koriste hijerarhijsko kaskadno naponsko propuštanje (eng. *Hierarchical cascaded power gating – HCPG*) i hijerarhijsko višestupanjsko vremensko propuštanje (eng. *hierarchical multi-level clock gating - HMLCG*) [3].

LTE mreže omogućavaju brzu povezivost, te prijelazi s jedne na drugu baznu stanicu (s jednog eNB-a na drugi) predstavljaju ključnu ulogu u mobilnosti korisnika. U LTE mrežama ne postoji standardan algoritam za prijelaze, međutim mekani prijelazi nisu preporučeni (eng. *Soft handover*) [3]. Glavne izazove predstavljaju kašnjenje, gubljenje redoslijeda prenesenih paketa i visoke vjerojatnosti nezadovoljavajućeg prijema. Polumekani prijelazi (eng. *Semi-soft handover*) omogućavaju najmanju vjerojatnost nezadovoljavajućeg prijema te povećavaju pouzdanost VoIP usluga preko LTE mreža [3].

LTE-A (eng. *LTE-Advanced*) standard je razvijen s ciljem povećavanja sistemskih performansi i mogućnosti LTE radio pristupne mreže. LTE-A standard podrazumijeva 1 Gb/s brzinu u silaznom smjeru, te 500 Mb/s u uzlaznom smjeru [3]. LTE mreže nove generacije trebale bi zadovoljiti slijedeće karakteristike [3]:

- agregacija nosioca: više nosioca propusne širine od 20 MHz je agregirano na propusne širine od 100 MHz, a u svrhu povećanja brzine prijensa

- podrška preusmjeravanju paketa (eng. *Relaying support*): za povećavanje doseg a smanjenje troškova instaliranja. Npr. LTE-A *multihop* mrežna arhitektura na drugom OSI sloju podržava upravljanje radio resursima i to na udaljenim čvorovima (eng. *Remote Nodes - RN*). Udaljeni čvorovi omogućavaju zajedničko usmjeravanje, prilagodbu veza te raspoređivanje, te na taj način pomažu eNB-ovima da što efikasnije upravljaju radio resursima. Pojedine simulacije pokazuju da *multihop* LTE-A mreže pokazuju bolje karakteristike od *single-hop* LTE mreža po pitanju omjera signala i šuma, omjera interferencije, te propusnosti [3].

- prošireni više-antenski prijenos: za povećanje ulaznih/silaznih prijensa, što zatim povećava i brzinu prijensa

- koordinirani višespojni prijenos/prijem: više ćelija istovremeno prenosi/prima signale za poboljšavanje performansi rubnih čvorova

- kompatibilnost s ranijim standardima: da LTE korisnici kao i korisnici LTE-A mogu koristiti mrežne resurse, kako bi se potakla *pay-as-you-grow* migracija.

U GPON-LTE konvergiranoj mrežnoj arhitekturi (eng. *GPON-LTE Converged Network Architecture – GLCNA*) sastavne dijelove čine OLT uređaj, pasivni djelitelj, hibridni ONU-eNB uređaj (eng. *Evolved Node B – eNB*, uređaji koji direktno komuniciraju sa korisničkim mobilnim uređajima), te uređaji korisničkog terminala i opreme [34]. U GLCNA mrežama međudjelovanja funkcionalnih modula između krajnjih korisnika i OLT uređaja se mogu sažeti u 6 koraka [34]:

- 1) Zahtjevi za spajanje koji potječu od niza aplikacija kod korisničkih terminala i opreme dolaze do agregatora zahtjeva GPON/LTE mreže u obliku poruka - zahtjeva za propusnim pojasem, pri čemu su zahtjevi koji povezuju ONU-eNB agregirani te klasificirani od T-CONT 1 do T-CONT 4 ili QCI 1 do QCI 9, pri čemu T-CONT označava prijenosne kontejnere (eng. *Transmission Container*), kao najmanju jedinicu prijenosa podataka u komunikaciji ONU-OLT, a QCI označava identifikator klase kvalitete usluge (eng. *QoS Class Identifiers*) koji se koristi u LTE mrežama za osiguravanje kvalitete usluge za pojedinog nosioca.
- 2) Zahtjevi za klasama usluga unutar GPON/LTE zahtjeva se transferiraju i mapiraju u red GPON prioriteta u obliku GPON REPORT poruke sa agregiranim zahtjevima, te čekaju idući ciklus prozivanja
- 3) Kada REPORT poruka dođe do OLT uređaja, modul za alociranje propusnog pojasa OLT uređaja dodjeljuje propusni pojas za ONU-eNB te šalje GRANT poruku koja uključuje podatak o alociranom propusnom pojasu.
- 4) Nakon određenog vremenskog intervala GRANT poruka sa dozvoljenim propusnim pojasem za GPON klase usluge dolazi do GPON procesora za dozvole gdje se pojedine klase usluge GPON-a mapiraju na neki od LTE QoS. Kada je traženi propusni pojas dodijeljen ONU-eNB, GPON uzlazni/LTE uzlazni raspoređivač realocira propusni pojas za korisničku opremu na temelju traženog propusnog pojasa. Generator LTE dozvola za korisničke uređaje predaje traženi propusni pojas te vrijeme prijenosa za poruke koje se prenose kroz zračnu vezu.
- 5) U ovom koraku rezervacija propusnog pojasa te raspoređivanje prijenosa se izvode na upravljačkoj ploči. Na temelju propusnog pojasa alociranog za korisničku opremu, raspoređivač za korisničku opremu osigurava propusni pojas za klase usluga za prijenos prometa. Tijekom prijenosa svi LTE prometni tokovi su obuhvatili GPON prometni tok te je praskaviti prijenos alociran na zračnu vezu.
- 6) Praskovi podataka od T-CONT 1 do T-CONT 4 ili QCI 1 do QCI 9 su raspoređeni i preneseni do ONU-eNB. Preko rekonstruktora paketa i klasifikatora, veze GPON/LTE podataka se vraćaju u aplikacijske tokove te se uz pomoć QoS mapera multipleksiraju u prioritetne redove čekanja. Raspoređivač GPON ONU uređaja prenosi podatke uključujući REPORT poruke u predodređenom vremenu do OLT uređaja. Konačno,



podatkovni praskovi koji dolaze od korisničke opreme se prenose sa minimalnim kašnjenjem do OLT uređaja kroz ONU-eNB.

Posebno su interesantne nove generacije 3GPP LTE-A mreža tzv. heterogene mreže (eng. *HetNets*). Heterogene mreže se sastoje od makro baznih postaja, piko baznih postaja, femto baznih postaja i releja, te predstavljaju ekonomični i fleksibilni način izgradnje bežične pristupne mreže [32]. Heterogene mreže su pogotovo pogodne za pokrivanje područja koja su podkapacitirana ili područja tzv. rupa koje se nalaze između makro baznih postaja, te do njih ne doseže ni jedna okolna bazna postaja. Ovakvim pristupom se ujedno smanjuje i opterećenje makro baznih postaja. Femto bazne postaje najčešće instaliraju sami korisnici za pokrivanje bežičnim signalom prostorija unutar zgrada [33]. Piko bazne postaje imaju sličan zadatak kao i makro bazne postaje, međutim one pokrivaju manje područje, te su dobro rješenje za *hotspot* ili za pokrivanje tzv. rupa bežičnim signalom. Relej pokriva otprilike jednako područje kao i piko bazna postaja, međutim releji zahtijevaju povezanost sa njima nadređenom makro baznom postajom. Releji, također, koriste dio radijskih resursa njima nadređenih makro baznih postaja. Najčešća primjena releja je za povećanje dosega.

### 2.2.3 Bežične isprepletene mreže

Bežične isprepletene mreže (eng. *Wireless Mesh Networks – WMN*) povećavaju fleksibilnost, pouzdanost, a i same performanse bežične mreže. Najvažnija značajka WMN mreža je mogućnost samoobnavljanja uslijed greške i to upravo zbog isprepletenosti mreže. Dva glavna pristupa u izradi bežične mreže su:

- infrastrukturne mreže: STA (korisnici) baziraju svoju komunikaciju na položenoj infrastrukturi – hijerarhiji [3,14]. Komunikacija se odvija preko centralne točke, npr. AP. Moguća je, dakle, komunikacija među AP-ovima i između AP-ova i korisničkih uređaja. Neki od uređaja – usmjerivača povezani su žičano sa internetom, te preko njih ide sav promet namijenjen internetu. Ovi uređaji se nazivaju *default gateway* uređajima. Primjeri ovakvih mreža su GSM (eng. *Global system for mobile communications*) i UMTS (eng. *Universal mobile telecommunications system*). Ovakve mreže predstavljaju dobro rješenje za bežične pristupne mreže zbog svoje ekonomičnosti, fleksibilnosti i skalabilne arhitekture.
- manje infrastrukturne mreže (klijentske mreže): STA uređaji direktno međusobno komuniciraju. Ovakve mreže su poznate i pod nazivom mobilne *ad-hoc* mreže. STA uređaji mogu obavljati i funkcije usmjerivača [3, 14].

Protokoli usmjeravanja kod WMN mreža se mogu podijeliti na osnovne dvije grupe: proaktivne (npr. optimizirano usmjeravanje na temelju stanja veze (eng. *Optimized Link State Routing - OLSR*)) i reaktivne (npr. protokoli bazirani na vektorima udaljenosti za *ad-hoc* zahtjeve (eng. *Ad-hoc On-demand Distance Vector – AODV*)) [14]. Proaktivni protokoli unaprijed definiraju cijeli put prijenosa od polaznog čvora do odredišta bez obzira na opterećenje mreže na tim segmentima, te se ti podaci spremaju u tablicama usmjeravanja. Reaktivni protokoli proračunavaju put usmjeravanja prema zahtjevima, a na temelju klasa



AODV protokol je baziran na DSDV protokolu (eng. *Destination Sequence Distance vector*) tako što nastoji minimizirati broj *broadcast* paketa [3]. Kada MP želi poslati paket nekom drugom MP-u u mreži, a pri tom nema definiranu rutu do tog čvora, isti pokreće *path discovery* proces tako što odašilje PREQ (eng. *Path Request*) paket svim svojim susjednim čvorovima, a oni opet prosljeđuju taj upit svim svojim susjednim čvorovima, sve dok paket ne stigne do željenog čvora. Svi ti paketi imaju u sebi broj sekvence čime se sprječava stvaranje petlji te se osiguravaju najnoviji podaci o rutama. Svaki čvor između izvorišne i odredišne adrese pamti na kojem portu, te od kojeg susjeda je dobio pojedini PREQ paket, unosi ga u tablicu usmjeravanja kako bi najkraćim putem vratio povratnu informaciju. Kada upit dođe do odredišnog čvora isti odgovara sa PREP paketom (eng. *Path Reply*) cijelim putem natrag do izvorišnog čvora. Svi podaci o putu između ova dva čvora se neko vrijeme zadržavaju u tablicama usmjeravanja svih usmjerivača na toj ruti kako bi se slijedeća komunikacija odvijala brže, bez ponovnog otkrivanja najkraćeg puta. *Hello* porukama pojedini čvorovi obavještavaju susjedne čvorove o najnovijim podacima o svim rutama koji preko njih prolaze.

Za komunikaciju između MP-ova i MPP-ova postoje dva mehanizma [3]:

- proaktivni PREQ – MPP periodički šalje PREQ pakete dok MP kreira i održava podatke o rutama do pojedinih MP-ova, a koji se tiču metrike i parametara broja skokova (eng. *Hop count*) koji se spremaju u tablici usmjeravanja.
- proaktivni RANN – MPP periodički šalje *broadcast* pakete glavne najave (eng. *Root announcement – RANN*), koji označavaju dostupnost i položaj MPP-ova u mreži.

U slučaju da MP ima definiran put do više MPP-ova, odabire onaj sa najmanjim brojem skokova. Ova dva mehanizma se ne mogu koristiti istovremeno. RM-AODV (eng. *Radio metric – AODV*) je standardni pristup odabira pute prema 802.11s standardu, a koristi metriku vremena veze (eng. *Airtime link*) [3]. Ovaj parametar označava količinu iskorištenog kapaciteta kanala pri prijenosu paketa. Očekivana količina prijenosa (eng. *Expected Transmission count – ETX*) je još jedna metrika definirana 802.11s standardom, a koja je bazirana na omjeru uspješnog prijenosa paketa i omjeru uspješnog povratnog prijenosa paketa [3]. Očekivano vrijeme prijenosa (eng. *Expected Transmission Time - ETT*) je metrika koja je bazirana na omjeru izgubljenih paketa i na propusnom pojasu [3].

Na drugom OSI sloju definiran je mehanizam za pristup mediju naziva isprepleteni predodređeni pristup (eng. *Mesh deterministic access – MDA*) za osiguravanje kvalitete usluge s kraja na kraj mreže za promet osjetljiv na kašnjenja [3]. MP-ovi rezerviraju bežični medij za MDA mogućnosti (eng. *MDA Opportunities – MDAOP*) koristeći dva tipa vremenskih perioda [3]:

- susjedna MDAOP vremena koja označavaju vremena slanja/primanja za pojedini MP, kada su dva susjedna MP-a prijatelj i pošiljalac za taj MDAOP.
- MDAOP vremena interferencije su vremenski periodi pojedinih MP-ova koji vode evidenciju o MDAOP-ovima susjednih MP-ova, pri čemu ti MP-ovi ne sudjeluju ni kao primatelji ni kao pošiljalci u tom periodu.

WMN mreže su posebno interesantne za gusto naseljena područja. Povećavanjem broja skokova (eng. *Hops*) povećava se i opterećenje WMN mreže, te se ujedno povećava i interferencija među susjednim signalima koji prelaze preko istih čvorova. Jedan od načina da se poveća propusnost mreže u ovakvim situacijama jest da se koriste napredne tehnologije na fizičkom sloju, da se koriste efikasniji MAC protokoli, te ponovno iskorištavanje određenih frekvencija. Isprepleteni usmjernici (eng. *Mesh Routers – MR*) mogu primati pakete samo sa sebi dva susjedna usmjernika, te se njihova zona interferencije prema njima susjednim signalima može rasprostrirati maksimalno do dva skoka od tog promatranog MR-a. Ukoliko u mreži koja je prekapacitirana dodamo *default gateway* uređaj na mjesto svakog četvrtog MR-a da bi se zadržao konstantan omjer *default gateway* i MR-ova, ukupni propusni pojas bi dostizao konačnu vrijednost, a kapacitet bi se povećavao [14]. Također, u literaturi se može naći i podatak da se povećavanjem omjera *defaultnih gatewaya* naspram MR-ova povećava propusnost po pojedinom usmjerniku, te sveukupni kapacitet mreže [14]. Razlog tomu je što se za veći omjer *default gateway*/MR prosječan broj potrebnih skokova paketa smanjuje. Svaki *defaultni gateway* je spojen (bežično ili žično) sa pozadinskom mrežom (eng. *Backhaul*) te omogućuje spoj na Internet. S druge strane, pristup smanjenja ćelija (eng. *Cell splitting*) uvođenjem dodatnih MR uređaja na mjestima gušćeg prometa ne donosi ukupno povećanje propusnog pojasa za WMN mrežu, iako smanjuje opterećenje za pojedini MR [14].

Pozadinska mreža koja povezuje *default gateway* uređaje može biti izvedena bežično ili žično. Bežična *backhaul* mreža se sastoji od tri sloja [14]. Prvi sloj obuhvaća bežičnu mrežu *default gatewaya* sa MR-ovima koji su raspršeni po nekom području. Drugi sloj obuhvaća višetočkastu mrežu (eng. *Point-to-multipoint*) od pristupnog tornja do pojedinog *default gatewaya*. Pojedini pristupni toranj podržava brzine do 300Mb/s. Konačno, treći sloj podrazumijeva točkastu vezu (eng. *Point-to-point*) između pristupnih tornjeva i agregacijskih tornjeva koja može podržavati do 1Gb/s brzine. Za žično rješenje pozadinske mreže optički mediji imaju značajne prednosti u odnosu na bakrene medije po pitanju propusnosti i samog dosega. Upravo kombinacija optičke mreže u pozadinskoj mreži sa prednostima bežične mreže u pristupnom dijelu je temelj razvoja hibridnih optičko-bežičnih mreža.

### 3. PRIMJERI ARHITEKTURA HIBRIDNIH OPTIČKO-BEŽIČNIH MREŽA

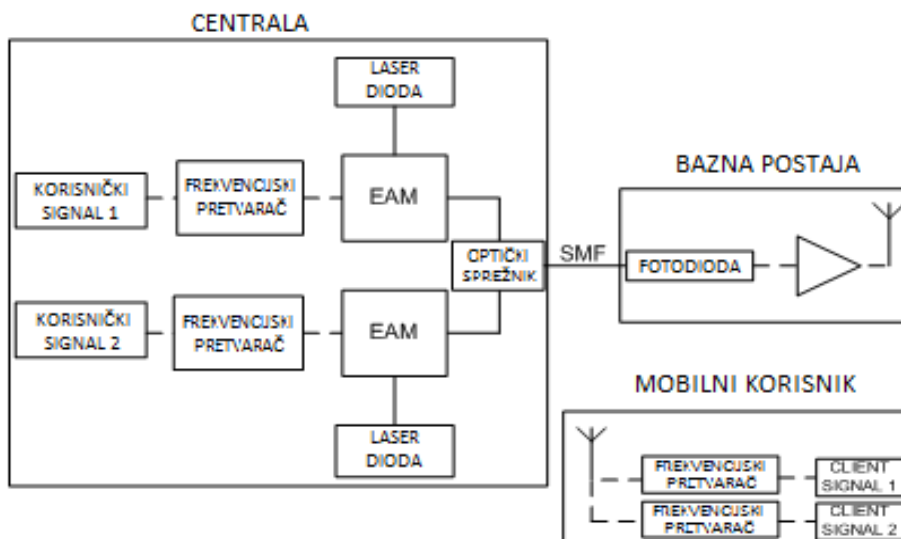
Tijekom cijelog svog razvoja optičke i bežične mreže su bile razvijane odvojeno jedna od druge, te je samim time svaka razvila svoje prednosti i značajke. Ono što je ključno po pitanju optičkih i bežičnih mreža je što upravo nedostaci jedne tehnologije predstavljaju značajne prednosti druge. Rad na daljnjem istraživanju bežičnih mreža se odnosi na osjetljivosti signala, te na optimiziranom korištenju mrežnih resursa kako bi se postigla u isto vrijeme ekonomičnost te zadovoljavajuća usluga. Kod optičkih mreža, s druge strane, daljnji razvoj se temelji na smanjenju troškova, jednostavnosti, kompatibilnosti s prijašnjim standardima te, konačno, optičkom transparentnosti čime bi se značajno proširile mogućnosti novih usluga. Glavni nedostaci optičke mreže su što nije dostupna svugdje, međutim tamo gdje postoji optička mreža dostupna je i ogromna količina propusnog pojasa. Bežične mreže, s druge

strane, mogu biti dostupne gotovo bilo gdje, međutim one same omogućavaju prijenos vrlo limitiranog propusnog pojasa koji je ujedno i podložan vanjskim faktorima (interferencija i sl...). Upravo zbog ovakve komplementarnosti hibridne optičko-bežične mreže predstavljaju veliki interes u razvoju pristupnih mreža nove generacije. Kombinirajući kapacitet optičke mreže sa dostupnošću bežične postavljaju se temelji za izgradnju nove mreže koja može omogućiti korištenje najnovijih usluga kao i razvoj onih usluga koje još i nisu implementirane nego su još predmetom istraživanja.

Postoji dosta primjera i koncepata arhitekture FiWi mreža baziranih na RoF i R&F tehnikama. PON mreže su najčešće rješenje za optički segment hibridne arhitekture, međutim bežični segment nudi dosta opcija od kojih su najčešće WiMAX, WiFi i WMN mreže. Već prije je navedeno da WiMAX neće biti predmetom ovog rada zbog nedovoljno razvijenih usluga u Republici Hrvatskoj, iako se nameće kao vrlo zanimljiva opcija u arhitekturama hibridnih optičko-bežičnih mreža. Uz to, WMN mreže su u literaturi najmanje zastupljene, dok se WiFi i WLAN mreže nameću kao najinteresantnija alternativa. Najistaknutiji izazovi koji proizlaze iz ovih arhitektura su usmjeravanja i dodjela bežičnih kanala. Usmjeravanja i dodjela kanala se može u potpunosti implementirati u bežičnom segmentu koristeći AP i bazne stanice ili se u potpunosti mogu implementirati u optičkom segmentu u centrali (CO) i na OLT uređaju.

### **3.1 RoF i R&F mreže**

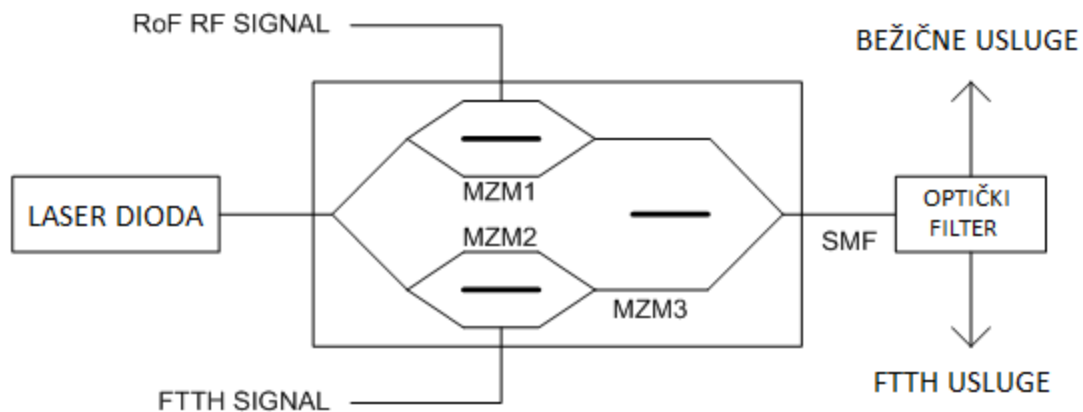
*Radio over Fibre* – RoF mreže podrazumijevaju prenošenje radio frekvencija (RF) preko optičkog kabela od centralne postaje (eng. *Central Station*) do udaljenih antenskih jedinica (eng. *Remote Antenna Units*). Za efikasniji prijenos RF signala, koji su vremenski promjenjivi, koriste se metode centraliziranog dinamičkog dodjeljivanja kanala na strani centralne postaje [3]. Za izbjegavanje opremljivanja pojedine antenske jedinice sa laserskim uređajem, te instaliranje opreme namijenjene kontroliranju parametara lasera, kao što su npr. temperatura, izlazna snaga i linearnost, primijenjena je modulacija na daljinu na svakom udaljenom radio portu. RoF mreže su transparentne na različite oblike modulacija, te podržavaju različite digitalne formate i bežične standarde. Također predstavljaju dobro rješenje za istovremeni prijenos signala širokopojasnog kodiranog višestrukog pristupa (eng. *Wideband Code Division Multiple Access – WCDMA*) i GSM (eng. *Global System for Mobile Communications*) signala [3]. Na slici 5 je prikazan način funkcioniranja jednostavne RoF mreže.



Slika 5. RoF mreža sa SMF kabelom

Dva odvojena klijentska radio signala se prenose od centralne postaje preko jednomodnog vlakna (eng. *Single Mode Fiber* – SMF) do bazne stanice, te dalje do korisnika. U centrali se prvo ulazni signali moduliraju na višu frekvenciju uz pomoć konvertera. Nakon navedenog, svaki signal dolazi do svog elektroapsorpcijskog modulatora (eng. *Electroabsorption Modulator* – EAM), koji moduliraju valne duljine – nosioce uz pomoć dvije odvojene laser diode. Optički spajatelj, spaja dva optička signala na jednomodno optičko vlakno (eng. *Single Mode Fiber* – SMF). U baznoj stanici fotodiode izmjenjuje dolazni optički signal u električnu domenu, te emitira pojačani signal preko antene do mobilnog korisnika, koji, opet, uz pomoć frekvencijskog konvertera ekstrahira pojedini radio signal namijenjen korisniku. Na taj način RF signali su preko optičkog medija preneseni do krajnjeg korisnika.

Za mogućnosti pružanja raznolikih usluga u pristupnoj mreži važna je integracija RoF sustava u postojeću optičku pristupnu mrežu. Za istovremenu modulaciju i prijenos RF signala i FTTH signala koristi se integrirani vanjski modulator. Taj modulator se sastoji od tri Mach-Zehnder modulatora (MZM). Pojedini RF i FTTH signal modulira optički signal - nosioc u sebi pripadajućem Mach-Zehnder modulatoru uz pomoć zajedničke laser diode. Optički bežični signal i modulirani FTTH signal se zatim u trećem Mach-Zehnder modulatoru kombiniraju. Nakon trećeg MZM-a signal se prenosi preko SMF kabela do korisničke lokacije, gdje se na optičkom filteru vrši dijeljenje signala / rekonstrukcija, koji se opet dijeli za bežičnu i FTTH primjenu. Ovaj sustav RoF mreže prikazan je na slici 6.



Slika 6. Vanjski integrirani modulator s tri MZM

Pojedinim istraživanjima je pokazano da se 1,25 Gb/s optički signal te RF signal sa kanalom širine 20MHz pri 622 MHz prenose preko SMF vlakna s dosegom preko 50km sa zadovoljavajućim performansama [3, 24].

Povezivanje optičke distribucijske mreže na bežičnu mrežu može imati značajne posljedice na performanse MAC protokola. Kašnjenje uslijed propagacije može uzrokovati istjecanje određenih *timer* MAC protokola što značajno kompromitira funkcioniranje mreže. U distribuiranim MAC protokolima (npr. DCF – eng. *Distributed Coordination Function*) kod 802.11 a/b/g/n WLAN mreža izvorišni čvor uslijed početka prijensa podataka aktivira *timer* koji definira period u kojem taj čvor očekuje potvrdu o primitku paketa od strane primatelja. Ta potvrda je definirana kao ACK (*acknowledge*) okvir. Ukoliko taj *timer* istekne, a izvorišni čvor nije primio potvrdu – ACK okvir, čvor će to razumjeti kao da paket nije stigao do odredišta te će ponoviti slanje. Ukoliko nakon nekoliko uzastopnih opetovanih pokušaja izvorišni čvor i dalje ne dobiva ACK okvir kao potvrdu uspješnog prijensa, tada će se pretpostaviti da odredište nije dostupno, te će se odustati od prijensa. Uslijed duljine optičkog segmenta (SMF kabela) može doći do značajnog kašnjenja u propagaciji RF signala preko optičkog signala, što može uzrokovati istjecanja MAC protokol *timer*. Jedno od rješenja ovog problema može biti povećanje vremena *timer*, međutim to smanjuje kvalitetu mreže, a i u DCF mrežama *timer* za ACK okvir ne može biti dulji od prostora između pojedinih DCF okvira (eng. *DCF interframe space – DIFS*), koje sprječava kolizije prilikom istovremenog pristupa više korisnika zajedničkom mediju. Za WLAN mreže zbog navedenih izazova doseg RoF mreže je do 1948m [3, 24]. Primjena RoF mreža je često prisutna u CATV uslugama [15]. Električni RF signal (54-870 MHz) je prvo konvertiran u modulirani svjetlosni signal koristeći lasere koji rade na valnim duljinama od 1310 nm i 1550 nm. Signal se potom prenosi SMF kabelom do korisnika gdje se ponovno konvertira u RF električni signal koji potom dolazi do TV set top boxa. RoF mreža je također vrlo pogodna za pristupe tzv. mrtvim zonama (tuneli, planinski prostori, itd...) koristeći repetitore. RoF mreže su se pokazale korisnim i u FTTH arhitekturama [15].

Efikasan način izbjegavanja ovih poteškoća je ostvaren kroz R&F mreže (eng. *Radio and Fiber – R&F*). RoF mreže koriste optički medij kao analogni prijenosni medij od centralnog dijela do udaljenih antenskih jedinica, pri čemu je centralni dio zadužen za upravljanje pristupom optičkom i bežičnom segmentu. U R&F mrežama ova dva segmenta su odvojena,

tj. MAC protokoli u pojedinim segmentima (optičkom i bežičnom) su međusobno neovisni, dok se njihova integracija odvija na sučeljima koji povezuju dva segmenta hibridne mreže. Na taj način optički MAC protokoli se ne prenose optičkim medijem, pa se samim time izbjegava kašnjenje uslijed propagacije. U WLAN R&F mrežama upravljanje pristupom je lokalizirano na tu WLAN mrežu. R&F mreže su posebno pogodne za WiFi mreže, koje primjenom ovog pristupa mogu čak i povećati svoj doseg [3, 24].

Sve navedeno za R&F i RoF mreže se odnosi na MAC protokole kao što je DCF, međutim ne može se odnositi na MAC protokole kod kojih je pozivanje i organiziranje za višestruki pristup zajedničkom mediju centralizirano, kao što su npr. WiMAX ili mobilne mreže.

Na temelju frekvencije RF signala korištenog na linku u RoF mreži, a u usporedbi sa signalom generiranim u RAU, RoF tehnologije se mogu podijeliti u tri osnovne kategorije [16, 17]:

- 1) RF preko vlakna (RFoF)
- 2) Međufrekvencije preko vlakna (IFoF)
- 3) Nemodulirani signal preko vlakna (BBoF)

U IFoF i BBoF tehnologijama mikrovalni signal se generira u RAU kroz konverziju sa lokalnim oscilatorom. Na temelju tehnika modulacije/detekcije signala RoF pristup se može podijeliti na:

- 1) Modulacija intenziteta – direktna detekcija (IMDD)
- 2) Udaljena heterodinska detekcija (RHD)
- 3) Tehnike harmonijske konverzije

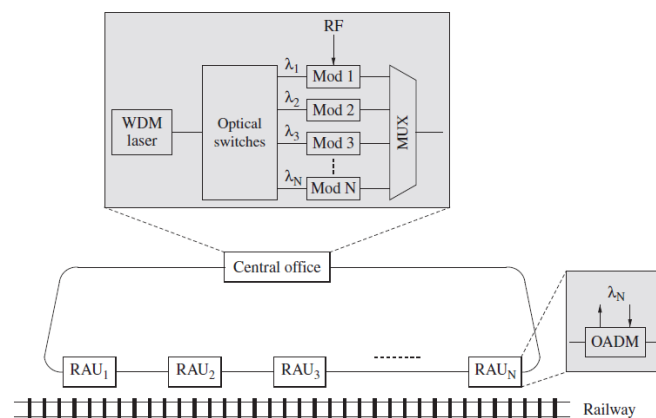
RFoF sustavi koriste IMDD tehnike, dok IFoF i BBoF također mogu koristiti IMDD za prijenos nemoduliranih signala do RAU, međutim u većini slučajeva se oslanjaju na RHD RF signale [16,17]. Tehnologije generiranja optičkog signala kod RoF mreža obuhvaćaju četverovalno miješanje ili kros-faznu modulaciju u HNL-DSF (eng. *Highly Nonlinear – Dispersion Shifted Fibre*) optičkim medijima, kros-apsorpcijsku modulaciju u elektroapsorpcijskom modulatoru, te eksternu modulaciju intenziteta ili eksternu faznu modulaciju [3, 24]. Posebno je zanimljiv pristup s jednim laserskim izvorom na strani centrale koji generira valnu duljinu za silazni promet. Udaljena antenska jedinica zatim iskorištava tu istu valnu duljinu za uzlazni promet, te je na taj način potrebna instalacija laserskih uređaja samo na strani centrale [3, 24]. Sheme remoduliranja signala na strani udaljenih antenskih jedinica uključuje kombinacije za silazni i uzlazni promet: DPSK (eng. *Differential phase-shift-keyed*) za silazni/OOK (eng. *On-off keyed*) za uzlazni promet, OCS (eng. *Optical Carrier Split*) za silazni promet te ponovno iskorištavanje signala nositelja za uzlazni promet i konačno faznu modulaciju za silazni promet dok se reflektirani optički nositelj pojačava i modulira koristeći poluvodičko optičko pojačalo (eng. *Semiconductor Optical Amplifier – SOA*) [3, 24]. Korištenje bezbojnog SOA pojačala i modulatora za uzlazni prijenos predstavlja jeftino RoF rješenje koje je prilično jednostavno za održavanje [24].

Za tehnologije R&F mreža u optičkom segmentu se koriste podesivi laseri/primatelji, ONU uređaji neosjetljivi na boju te primopredajnici u praskovitom modu rada. Bežični segment podrazumijeva korištenje WiFi, WMN i WiMAX tehnologija [3].



### 3.2 Mobilne arhitekture

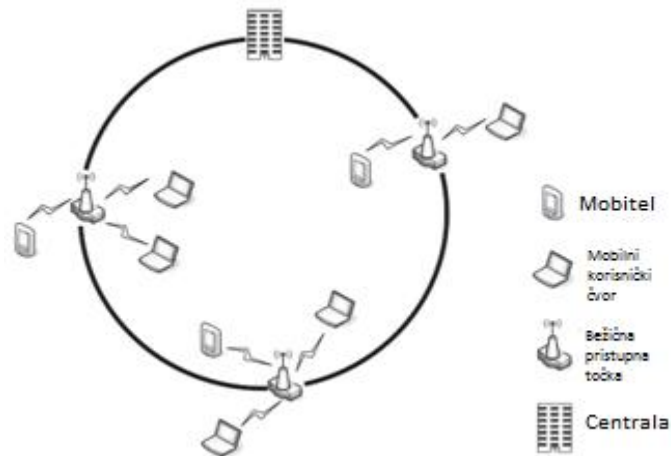
Mobilne mreže su posebno interesantne u slučajevima kada se korisnik giba značajnim brzinama (npr. u automobilu, vlaku ili sl...) te su potrebni prelazi s jedne bazne stanice na drugu. Prilikom navedenog poseban izazov je što efikasniji prelazak (eng. *Handover*) s jedne stanice na drugu, a da se pri tom zadrži zadovoljavajuća kvaliteta usluge. Veliki broj ovakvih prelazaka značajno utječe na brzinu prijenosa podataka i može utjecati na povećanje gubitaka paketa u prijenosu [24]. Jedno od rješenja ovih problema predstavlja RoF mreža [3, 24]. Arhitektura mobilnih mreža koje koriste RoF tehnologiju se sastoji od WDM prstena koji povezuje sve RAU antene sa centralom, gdje se odvija sva obrada signala. Na svakoj RAU anteni instaliran je i *add-drop* multiplekser kako bi se iz prijenosa izvukla točno ona valna duljina koja je namijenjena tom određištu. U centrali WDM laseri generiraju tražene valne duljine koje zatim prolaze kroz RF modulatore, koji signale optičkog nosioca moduliraju na valne duljine namijenjene za pojedini RAU. Tako modulirani signali se zatim multipleksiraju na WDM prsten gdje se prenose do ciljanog RAU. *Add-drop* multiplekserom na ciljanom RAU se ekstrahira samo željena valna duljina koje se zatim demodulira, čime se dobije originalni RF signal koji se zatim bežično prenosi do prolazećeg vozila (npr. vlaka) do korisnika. U uzlaznoj komunikaciji svaki RAU skuplja sve RF signale, te ih preko WDM prstena prenosi do centrale, a na temelju podatka s koje je RAU antene stigao originalni RF signal, uređaji u centrali mogu predvidjeti lokaciju vlaka, te pokraj koje iduće RAU antene će vlak prolaziti, te će prema njoj i usmjeriti silazni promet. Primjer arhitekture namijenjene komunikaciji korisnika koji se nalazi u vlaku je dana na slici 7. Na ovaj način optičke mreža poboljšava prebačaj korisničke komunikacije s jedne bazne stanice na drugu zadržavajući pozitivno korisničko iskustvo. Hibridno frekvencijsko-valovodno multipleksiranje (FDM/WDM) podržava prenošenje RF kanala u 60 GHz frekvencijskom pojasu na pojedinoj valnoj duljini, te je također moguće postići komunikaciju s minimalnim brojem izgubljenih paketa tijekom gibanja korisnika pri brzinama od 40 m/s [3, 24]. RoF mreže su posebno interesantne jer su transparentne za pojedine modulatorske tehnike te podržavaju različite bežične standarde i digitalne formate. Unutar zgrada najčešće se koriste višemedna optička vlakna (RoF mreže unutar zgrada bazirane na višemednim vlaknima i WLAN mrežama), dok se u praksi u vanjskim uvjetima koriste pretežno jednomodna optička vlakna.



Slika 7. Koncept arhitekture RoF mreže sa mobilnom mrežom u bežičnom segmentu namijenjen za komunikaciju korisnika u vlakovima

### 3.3 Bežične mreže bazirane na WiFi tehnologiji

Jedan od primjera arhitekture hibridnih optičko-bežičnih mreža koji se baziraju na WiFi tehnologiji je jednosmjerni prsten (eng. *Unidirectional ring*) [3, 24]. Mreža podrazumijeva spoj centrale (CO) sa više AP-ova baziranih na WiFi-ju preko jednosmjernog prstena. Primjer takve arhitekture je dan slikom 8.

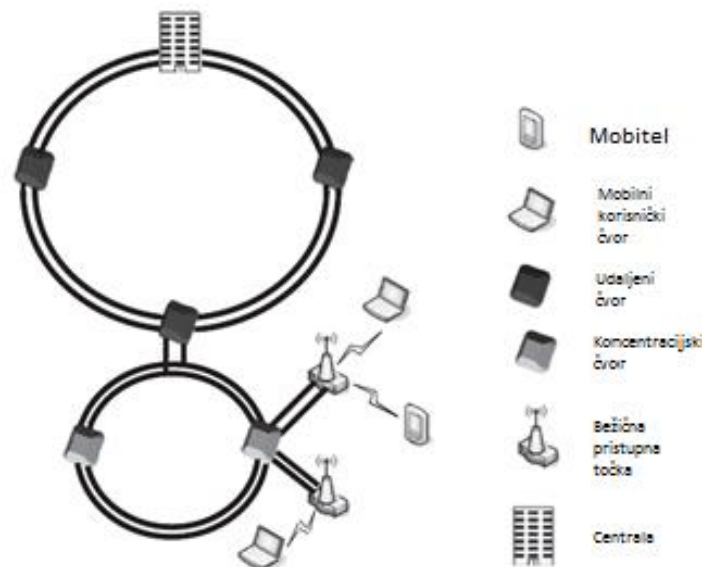


Slika 8. Arhitektura jednosmjernog prstena sa WiFi bežičnim segmentom

Uređaji u centrali upravljaju prijenosom informacija između čvorova mobilnih klijenata (eng. *Mobile client nodes – MCN*) i njima pripadajućim AP-ovima, te također imaju ulogu izlaza (eng. *Gateway*) prema drugim mrežama. Pojedini AP osigurava bežičnu pristupnu mrežu za mobilne čvorove koji se nalaze unutar dosegata tog AP-a. Svaki pojedini mobilni čvor periodično šalje informacije o snazi signala susjednih čvorova do sebi pripadajućih AP-ova, te na taj način sudjeluju u izgradnji topologije same mreže. Na temelju tih informacija AP može procijeniti udaljenosti među mobilnim čvorovima te proračunati najkraće rute. Za poboljšanje pouzdanosti bežičnih veza centrala šalje informacije do dva različita AP-a (raznolikost putova). Centrala ima mogućnost dodjeljivanja kanala brzo i efikasno koristeći jedan ili više valovodnih kanala na optičkom prstenu za zadovoljavanje višestrukih usluga kao što su WLAN i mobilne radio mreže.

Drugi primjer je arhitektura dvosmjernog prstena kao arhitektura dvorazinskog dvosmjernog prstena za DWDM/SCM (multipleksiranje podnosioca – eng. *Subcarrier multiplexing*) širokopojsne FiWi mreže [1, 3, 24]. Centrala povezuje udaljene čvorove kroz dvostruki optički prsten. Pojedini udaljeni čvor kaskadno povezuje više AP-ova kroz koncentracijske čvorove (eng. *Concentration nodes – CN*), gdje pojedini AP pruža usluge mobilnim čvorovima. Za osiguranje funkcioniranja mreže uslijed grešaka sama mreža je opremljena sa duplim brojem uređaja – radnih i pričuvnih. Svaki udaljeni čvor se sastoji od

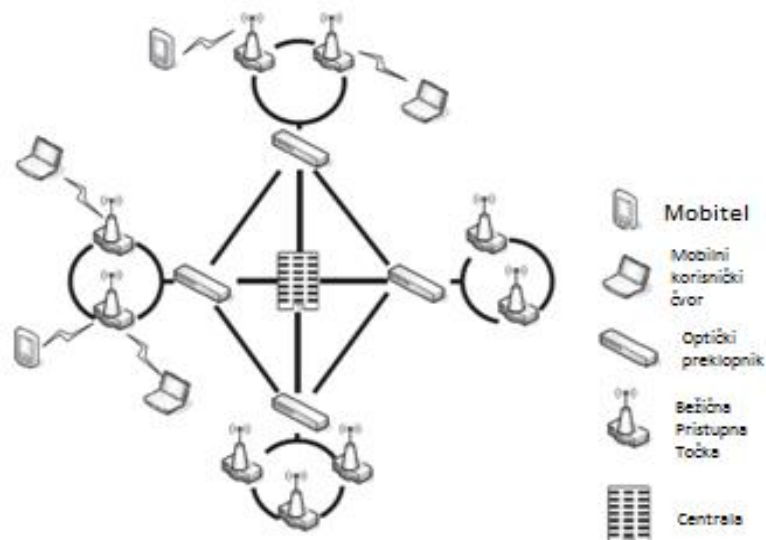
zaštitne jedinice i dvosmjernih valovodnih *add-drop* multipleksera, Primjer ovakve arhitekture je prikazan na slici 9.



Slika 9. Arhitektura dvosmjernog prstena integrirana sa WiFi bežičnim AP-ovima

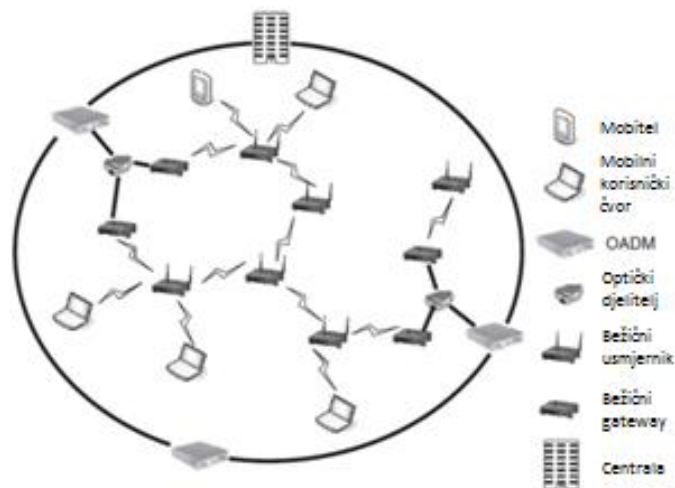
Svaki koncentracijski čvor sadrži zaštitnu jedinicu. AP obuhvaća optički primopredajnik, zaštitnu jedinicu, RF pretvarač, te antenu. Pojedini AP omogućava propusni pojas po kanalu od barem 5 MHz, te pokriva do 16 mobilnih čvorova koristeći FDM. Paketi se prenose od centrale u silaznom prometu preko udaljenih čvorova i koncentracijskih čvorova do AP-ova u smjeru obrnutom od kazaljke na satu. U slučaju grešaka i oštećenja na optičkim vlaknima među dvama udaljenim čvorovima ili među dvama koncentracijskim čvorovima promet se odmah prebacuje na orijentaciju u smjeru kazaljke na satu. Ove greške u mreži javljaju kontroleri u udaljenim i koncentracijskim čvorovima na temelju monitoriranog dolaznog optičkog prometa. U slučaju pada AP-a ponovno preneseni signali se usmjeravaju kroz alternativne optičke putove ubacivanjem optičkog preklopnika unutar predmetnog AP-a. Ovakva arhitektura pruža visoku pouzdanost, fleksibilnost, kapacitet i svojstva samoobnavljanja.

Slika 10 predstavlja hibridnu FiWi arhitekturu koja kombinira zvjezdoliku optičku arhitekturu te prstenastu arhitekturu [1, 3, 24]. Svaki optički prsten podržava više WiFi AP-ova koji su spojeni sa centralom i dva susjedna optička prstena preko optičkih preklopnika. Ti optički preklopnici imaju sposobnosti valovodne konverzije te povezuju AP-ove i centralu preko dijeljene point-to-point svjetlovodne veze. Mreža se periodički nadgleda tijekom definiranih intervala. Na kraju svakog intervala svjetlovodne veze se dinamički rekonfiguriraju na temelju različitih prometnih zahtjeva, tj. koristi se balansiranje opterećenja (promet se usmjeruje na manje opterećene svjetlovodne veze). U slučaju pada dijelova mreže, sporni svjetlovodni putovi se rekonfiguriraju koristeći redundantne optičke putove.



Slika 10. Optička hibridna zvjezdoliko-prstenasta mreža sa integriranim WiFi AP-ovima

Jednosmjerna prstenasta PON FiWi mreža se sastoji od optičkog WDM pozadinskog prstena sa više jednokanalnih ili višekanalnih PON mreža prikazanih na njih [3, 24]. Optički *add-drop* multiplekseri (OADM) povezuju OLT uređaje svake pojedine PON mreže sa WDM prstenom. Bežični *gateway* premošćuje PON mreže i WMN mreže. U silaznom smjeru podatkovni paketi se usmjeravaju od centrale do bežičnih *gatewaya* kroz optičku pozadinsku mrežu, te se zatim prosljeđuju do mobilnih klijenata preko bežičnih umreženih usmjernika. U uzlaznom smjeru bežični umreženi usmjernici prosljeđuju podatkovne pakete do pripadajućih bežičnih *gatewaya*, gdje se zatim prenose optičkom pozadinskom WDM mrežom do centrale koristeći valovodne kanale, pošto svaka PON mreža radi na pojedinom dinamički dodijeljenom valovodnom kanalu. Ovakva arhitektura zahtjeva sučelje između ONU uređaja i pripadajućih bežičnih *gatewaya* da bi se nadgledalo rad WMN mreže, te radili proračuni opterećenja pojedinih linkova i statusa bežičnih veza. Ako su pojedine PON mreže značajno opterećene, a druge manje opterećene, pojedini ONU uređaj se može dodijeliti manje opterećenoj PON mreži na način da se podesi valna duljina optičkih primopredajnika ONU uređaja i na taj način promet usmjerava na manje opterećene PON mreže. Ovakva mreža omogućava ekonomičnost, efikasno trošenje propusnog pojasa, veliki doseg, fleksibilnost i skalabilnost. TDM/WDM optička pozadinska mreža smanjuje zagušenje i latenciju paketa uz pomoć balansiranja opterećenja, a dinamička dodjela bežičnih kanala omogućuje jednostavno spajanje. Primjer ovakve mreže je dan na slici 11.



Slika 11. Optički jednosmjerni WDM prsten koji povezuje više PON mreža sa integriranim WiFi WMN mrežama.

Zajedno s tehnološkim napretkom, napreduju i korisničke potrebe, te su usluge samim time sve sofisticiranije što predstavlja izazov za pristupne mreže. U PON segmentu postoje dvije mogućnosti daljnjeg razvoja mreže kako bi se zadovoljile potrebe većeg propusnog pojasa za korisnike, a to su povećanje prijenosa podataka od 10 gb/s naviše ili migracija kanala više valnih duljina prema WDM-PON-ovima koji bi implementirali valnoduljinsko usmjeravanje ili valnoduljinsko razašiljanje podataka sa ili bez kaskadno povezanih TDM-PON mreža [24]. Na sličan način, za izbjegavanje uskog grla u bežičnom segmentu buduće FiWi pristupne mreže bi se trebale temeljiti na WLAN mrežama nove generacije (802.11n), koje omogućavaju prijenos podataka od 100Mb/s na više ili na IEEE 802.11ac WLAN mrežama vrlo visokog propusnog pojasa (eng. *Very High Throughput – VHT*) koje ostvaruju brzine prijenosa do 6900 Mb/s [24].

Promet u FiWi mrežama može biti peer-to-peer, tj. između dvaju bežičnih korisnika ili može biti realiziran kao veza od bežičnog korisnika na Internet. Bežični segment često zna predstavljati usko grlo u smislu dostupnog kapaciteta. Međutim kod *peer-to-peer* komunikacije može se iskoristiti prednosti dualne prirode hibridnih optičko-bežičnih mreža. Komunikacija između dva bežična korisnika se može ostvariti potpuno bežičnom vezom ili kombiniranjem bežičnih i optičkih resursa. Potpuno bežična veza podrazumijeva prijenos paketa preko više skokova (*hopova*) s jednog bežičnog klijenta na drugi sve dok paket ne stigne do odredišta. Kombinirana komunikacija, s druge strane, podrazumijeva bežični prijenos od bežičnog klijenta preko njemu pripadajućeg bežičnog *gatewaya* (*mesh router*) povezanog na ONU uređaj. U ONU uređaju se bežični signal konvertira u optički i dalje prenosi optičkim vlaknima do OLT uređaja u centrali. OLT, pak, razašalje poruke u silaznom smjeru na sve ONU uređaje, koji pak sami ekstrahiraju pakete koji su namijenjeni klijentima u bežičnom segmentu (na temelju odredišne adrese tog paketa), a koji su u zoni pokrivanja tog istog ONU uređaja. Na ovaj način se smanjuje pojava interferencije u bežičnom segmentu hibridne mreže, pa se samim time povećava i propusni pojas bežičnog segmenta [3]. PON segment, s druge strane, ima značajan dostupni propusni pojas tako da može bez većih tegoba podržati ovakvu komunikaciju. Upravo zbog svega navedenog optimalan položaj ONU

uređaja na određenom području predstavlja ključni moment prilikom planiranja hibridne optičko-bežične mreže. Optimalan položaj pretpostavlja da je broj skokova prilikom prijenosa paketa u bežičnom segmentu prema najbližem ONU uređaju minimalan. U literaturi je moguće naći više načina i algoritama za optimalno pozicioniranje ONU uređaja u topologiji od slučajnog pozicioniranja, fiksnog, pa sve do pozicioniranja temeljenog na metaheursitičnom *tabu search* algoritmu koji pokazuje najbolje rezultate u smislu omogućenog propusnog pojasa za mrežu [3, 24].

Razlike između FiWi i klasične WMN mreže se manifestiraju u ovisnosti o načinu prijenosa podataka. U slučaju uspostavljanja veze između bežičnog korisnika i interneta karakteristike i FiWi i WMN mreže su većinom slične, te veće razlike nema. Međutim, kada se u obzir uzme *peer-to-peer* komunikacija tada FiWi mreže pokazuju bolje karakteristike upravo zbog izbjegavanja uskog grla same bežične mreže te korištenja kapaciteta optičkog i bežičnog segmenta [24].

FiWi mreža se može i dodatno unaprijediti komunikacijom između više ONU uređaja preko OLT uređaja. U navedenoj komunikaciji moguće je izbjeći OLT uređaj korištenjem WDM/TDM FiWi mreže [3, 24]. Za ovakvu mrežu potrebne su i neke hardverske preinake. Tako npr. na OLT uređaj je potrebno instalirati niz fino podešivih predajnika, pri čemu svaki radi na dodijeljenoj mu valnoj duljini te tako omogućuje komunikaciju prema više ONU uređaja. ONU uređaji zahtijevaju fiksno podešene predajnike te fiksno podešene prijemnike za njima dodijeljene silazne i uzlazne valovodne kanale kojima će se prenositi paketi za među-ONU komunikaciju. Sav promet namijenjen za među-ONU komunikaciju se kombinira preko AWG rešetke na jednu optičku nit. Sprežnik i AWG rešetka se nalaze na udaljenom čvoru WDM/TDM PON mreže. S druge strane na AWG rešetku se spaja i OLT port za komunikaciju između OLT i ONU uređaja. Primopredajnici na ONU uređajima omogućuju komunikaciju između dva ONU-a preko AWG rešetke, pri tom zaobilazeći komunikaciju sa OLT uređajem, povećavajući tako propusni pojas mreže. Ovakvi dodaci na opremi i ovakva arhitektura povećavaju cijenu i trošak mreže.

FiWi mreže omogućavaju i rekonfigurabilnost [3, 24]. Naime, kada je pojedina PON mreža opterećena do te mjere da je i njezina sama funkcionalnost upitna moguće je neke od ONU uređaja koji imaju značajan promet premjestiti iz jedne PON mreže u drugu kako bi se smanjilo opterećenje. Pri tome prvo treba sav promet od ONU uređaja namijenjen OLT uređaju zaduženom za tu PON mrežu biti prenesen, tj. red čekanja tih paketa u ONU uređaju (eng. *queue*) mora biti sveden na nulu, nakon čega je rekonfiguracija na novu PON mrežu moguća. Uvjet za ovakvo upravljanje opterećenjem je ostvarivo ako dvije PON mreže dijele pojedine grane svoje topologije.

Jedan od primjera rekonfigurabilne FiWi mreže je metro prstenasta pristupna integrirana mreža (eng. *metro access ring integrated network*) – MARIN, koja integrira TDM/WDM PON mreže sa međusobno spojenim metro prstenastim pristupnim mrežama koristeći optički rekonfigurabilne uređaje i uređaje parametarske valnoduljinske pretvorbe (eng. *Parametric Wavelength Conversion – PWC*) [3]. Na svakoj prstenastoj mreži centrale su odgovorne za razdiobu ili skupljanje prometa iz njima podređenih PON mreža. Pojedinih ONU uređajima unutar te iste PON mreže OLT uređaji u centrali dodjeljuju određenu valnu duljinu. U silaznom toku MARIN gateway ekstrahira samo one valne duljine koje su namijenjene pojedinoj PON mreži te može dodavati metro promet na bilo koji valovodni kanal DWDM

prstena [3]. MARIN preklopnik optički usmjerava sav promet koji pripada pojedinoj MAN mreži koristeći valnoduljinski selektivni preklopnik (eng. *Wavelength Selective Switch – WSS*) i PWC. U ovakvoj sveoptičkoj MARIN mreži svi resursi pojedine PON mreže se mogu dijeliti od strane metro prstenastih pristupnih mreža.

Drugi primjer ovakvog tipa mreže je mrežasta rekonfigurabilna optičko-bežična mreža (eng. *Grid Reconfigurable Optical–Wireless Network*) – GROW-net [3, 24]. Osnovu GROW-net mreže čine rešetkaste ćelije, koje povezuju optičku *backbone* mrežu sa bežičnim *gateway* čvorovima. GROW-net je namijenjena prvenstveno urbanim FiWi mrežnim arhitekturama koja se lako prilagođava ulicama koristeći postojeće optičke kablove [24]. Također, ova arhitektura je i skalabilna u smislu propusnog pojasa te mogućnosti proširivanja same infrastrukture. Optička jezgrena infrastruktura je proširiva korištenjem procesa dijeljenja u obliku slova „H“. Optički terminali su međusobno povezani WDM vezama u obliku slova H, te je na svakom stupnju procesa razmak među susjednim WMN usmjernicima smanjen za 50%. Sama arhitektura se sastoji od centralnog čvora GROW-Net sa podesivim laserom, kojim se definiraju pojedini valnoduljinski kanali namijenjeni pojedinim terminalnim uređajima. Pojedini optički terminali su opremljeni sa tankim film filtrom (eng. *Thin Film Filter*) koji propušta samo one valne duljine koje su predeterminirane za predmetni optički terminalni uređaj. Optički terminali su bezbojni u smislu da mogu generirati bilo koju valnu duljinu u uzlaznom prometu (eng. *Colorless*) koristeći reflektivno poluvodičko optičko pojačalo (eng. *Reflective Semiconductor Optical Amplifier – RSOA*) za daljinsku modulaciju kontinuiranih valnoduljinskih signala poslanih od strane centralnog čvora. Također, zbog svoje mrežaste topologije GROW-net omogućuje bolju zaštitu optičkih vlakana od konvencionalnih PON arhitektura sa stablastim modelom [24].

Slijedeći primjer integrirane bežično/optičke mrežne arhitekture je projekt optičke mreže za distributivne, proširive, heterogene radijske arhitekture i *provisioning* usluga (eng. *Fiber Optic Networks for Distributed, Extendible, Heterogeneous Radio Architectures and Service Provisioning*) – FUTON [24]. U ovoj arhitekturi jednostavne RAU antene su spojene preko analognih RoF veza sa centralnom jedinicom (eng. *Central processing unit – CPU*), u kojoj se u isto vrijeme vrši obrada signala te upravljanje resursima. Signali namijenjeni pojedinim RAU antenama su u centralnoj jedinici multipleksirani na isto optičko vlakno korištenjem WDM ili SCM tehnika. Ova arhitektura također koristi i MMSE *precoding* za odvajanje korisničkih signala, tj. za uklanjanje interferencije na RAU antenama. Na ovaj način mobilni terminalni uređaji mogu primiti podatke pri visokim brzinama prijenosa koristeći jednake vremenske i frekvencijske resurse, ali u isto vrijeme uz značajno povećana zaglavlja u paketima namijenjenim za uzlazni promet [24].

Još jedan europski projekt naziva ACCORDANCE projekt izaziva veliki interes [24]. Mrežna arhitektura velikog kapaciteta te značajno povećanog dosega je bazirana na OFDMA (eng. *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) tehnologiji. ACCORDANCE projekt za cilj ima izradu koncepta koji bi garantirao povećan propusni pojas u agregacijskom dijelu, skalabilnost, povećanu fleksibilnost dodijele resursa, veći doseg, nižu cijenu opreme, te nižu energetska potrošnju. S druge strane, ova arhitektura omogućuje konvergenciju optičke infrastrukture sa standardnim bežičnim rješenjima. OLT uređaj upravlja sa dodjelom prometa velikom broju podnosioca, koji se propagiraju cijelom optičkom distributivnom mrežom, te se na korisničkoj strani demultipleksiraju. Podnosioci su grupirani na način da kreiraju OFDM

kanale (deseci do nekoliko stotina podnosioca po jednom kanalu), pri čemu svaki od njih je namijenjen različitom korisniku te koristi različite tehnologije. U silaznom prometu na strani OLT predajnika se koristi I/Q modulacija, dok se na ONU strani koristi jednostavna direktna detekcija. U uzlaznom prometu ONU predajnik koristi modulaciju intenziteta (IM), dok se na OLT strani koristi koherentna detekcija [24].

## 4. OPTIMIZIRANO PLANIRANJE HIBRIDNE OPTIČKO-BEŽIČNE MREŽE

### 4.1 Optimalno planiranje položaja ONU uređaja

Optimalno planiranje ONU uređaja je ključno za efikasnu izgradnju FiWi mreže. Najveći trošak izgradnje FiWi mreže otpada na investicije optičkih kablova, čiji su troškovi značajno veći od troškova uređaja koji se planiraju na oba kraja optičkog kabela (npr. OLT i ONU) [3]. Osnovni cilj izgradnje hibridne mreže je da što manji broj ONU uređaja obuhvaća maksimalni broj bežičnih usmjernika, tj. da ukupni trošak bežičnog usmjernika, bežičnog *gatewaya* i ONU uređaja planiranog na nekom području pokrivanja  $i$  bude što manji što se može prikazati izrazom (1) [30]:

$$\min \sum_{j \in \mathcal{S}_{11}} (c^{MR} y_j^{11}) + \sum_{j \in \mathcal{S}_{ONU}} ((c^{MG} + c_j^{ONU}) z_j^{11}) \quad (1)$$

Ograničenja PON arhitekture koja utječu na optimizaciju su doseg PON mreže, omjer dijeljenja i međusobna udaljenost ONU uređaja [27, 30]. Poviše navedena formulacija podrazumijeva i uvođenje četiri tipa ograničenja [30]:

1. Ograničenja pristupnog prometa – definiraju tehnologiju ulaznog prometa (IEEE 802.11 ili 802.16 standard)
2. Ograničenja prometa u kralježničkoj (*backbone*) mreži – osiguravaju komunikaciju pojedinog bežičnog usmjernika prema njemu pripadajućem *gateway* uređaju, te također omogućuju balansiranje toka.
3. Kapacitivna ograničenja – ograničavaju maksimalni kapacitet mreže na dostupni kapacitet uređaja i tehnologija koje isti koriste. Također, ova ograničenja osiguravaju pretpostavku da se interferencija između dva generatora bežičnog signala u pristupnoj mreži može zanemariti. Interferencija uslijed unutrašnjeg i/ili vanjskog prometa se može izbjeći upravljanjem dodjelom kanala.
4. Ograničenja na optičko-bežičnoj granici – osiguravaju potrebu za *gateway* uređajima za povezivanje mreže na internet mrežu.

Optimalno planiranje položaja ONU uređaja se može svesti i na matematički problem zvijezda sa minimalnom dilatacijom [31]. U svrhu pronalaženja optimalnog položaja ONU uređaja u pristupnoj mreži u obzir se uzima neograničeni optimizacijski problem, koji podrazumijeva da je u vremenu  $O(n \log n)$  moguće proračunati središte  $c$  bilo kojeg grafa sa  $V$  vrhovima koji tvore zvjezdoliku strukturu, te da točka  $c$  može biti bilo koja točka unutar



navedenog grafa, pod uvjetom da ista osigurava minimalnu dilataciju grafa [31]. U primjeru optimalnog planiranja ONU uređaja, vrhovima zvijezde  $V$  se mogu smatrati korisničke lokacije, dok bi središte takve zvjezdolike strukture  $c$  bio planirani položaj ONU uređaja, kojem bi ti isti korisnici gravitirali (preko bežičnog segmenta mreže).

Osnovni tipovi algoritama za optimizirano planiranje položaja ONU uređaja mogu se podijeliti na:

1. Nasumičan algoritam
2. Deterministički algoritam
3. Pohlepni algoritam
4. Algoritam simuliranog prekaljivanja
5. Algoritam pozicioniranja ONU uređaja za uravnoteženo opterećenje
6. Algoritam tabu pretraživanja
7. Hibridni algoritam i genetički algoritam

Mreža u kojoj je implementiran nasumični algoritam (eng. *Random algorithm – RA*) je podijeljena na više nepreklapajućih regija, te je položaj ONU uređaja za pojedinu regiju slučajan [23]. Ovakav algoritam je jednostavan, međutim pruža manje pouzdanu povezanost u mreži, jer se pojedini ONU uređaji mogu nalaziti u snopu ili mogu biti neupotrebljivi.

Nedostatke nasumičnog algoritma otklanja deterministički algoritam (eng. *Deterministic algorithm – DA*). Nakon što se mreža podijeli na više nepreklapajućih regija, ONU uređaji su planski smješteni u središte pojedine regije. DA algoritam je posebno pogodan za simetrične mreže, te zahtjeva manje vrijeme obrade za procjenu. S druge strane ovaj algoritam nije pogodno rješenje u slučaju nejednolike distribucije korisnika, tj. nije pogodan za nesimetrične mreže [23].

Jedan od prijedloga je i heuristički algoritam naziva pohlepni algoritam (eng. *Greedy algorithm - GA*). Ovaj algoritam ima za cilj pronaći položaj više ONU uređaja na način da minimizira prosječnu udaljenost (euklidsku udaljenost) između krajnjih korisnika bežične mreže i njima najbližeg ONU uređaja [3, 24]. Ovaj algoritam ne uzima u obzir optički segment hibridne mreže. Početna distribucija bežičnih korisnika je poznata, te ona može biti slučajna ili određena distribucija. Algoritam funkcionira u dvije faze. U prvoj fazi se bira najbliži ONU uređaj (primarni) za svakog pojedinog bežičnog korisnika. U drugoj fazi za svaki primarni ONU je dobiven skup bežičnih korisnika tako da je udaljenost između navedenog ONU uređaja i njemu pripadajućih bežičnih korisnika minimaliziran. GA algoritam daje dobre rezultate, te je u usporedbi sa algoritmom simuliranog prekaljivanja nešto skuplji, te zahtjeva manje vrijeme procesuiranja [23].

Idući primjer heurističkog algoritma optimalnog planiranja položaja ONU uređaja je simulirano prekaljivanje (eng. *Simulated Annealing*) [3, 23, 24]. Na temelju početne ONU distribucije, algoritam vrši perturbacije ONU uređaja s najvišim troškom sve dok se ne smanji trošak tog ONU uređaja u smislu prosječne udaljenosti istog od bežičnih korisnika. Za svaku uspješnu perturbaciju bežični korisnici se prebacuju na novi najbliži ONU uređaj. Onog trena kada nakon određene perturbacije više nema smanjenja troška, položaj ONU uređaja se vraća na prethodno stanje i smatra se da je algoritam u uravnoteženom stanju. Prema određenim istraživanjima ovaj algoritam pokazuje bolje rezultate od poviše prikazanog pohlepnog algoritma [3, 23].

Algoritam pozicioniranja ONU uređaja za uravnoteženo opterećenje (eng. *Load balance ONU Placement Algorithm – LBOP*) se sastoji od dva stupnja ONU pozicioniranja i uravnoteženog opterećenja [23, 29]. U prvom stupnju položaj pojedinog ONU uređaja je planiran korištenjem pohlepnog algoritma, te je odabran najbolji položaj za pojedini ONU uređaj na način da je broj svih uređaja minimaliziran, a da su istovremeno svi bežični usmjernici spojeni sa njima pripadajućim ONU uređajima (poštujući ograničenje broja skokova). U drugoj fazi koristi se mehanizam uravnoteženog opterećenja između više ONU uređaja. LBOP algoritam minimizira broj ONU uređaja, te na taj način osigurava ekonomičnu FiWi mrežu [23, 29].

Glavni cilj algoritma tabu pretraživanja (eng. *Tabu Search Algorithm – TS*) je minimiziranje broja bežičnih skokova od bežičnog usmjernika do ONU uređaja. Algoritam daje dobre performanse, međutim ne bavi se samim smanjenjem broja ONU uređaja, te ne osigurava ekonomičnost mreže [23].

Hibridni i genetički algoritam (eng. *Hybrid and Genetic Algorithm – HA & GA*) funkcionira u dvije faze. Predmetno područje se podijeli na više ćelija približno sličnih dimenzija. Potom se prvo hibridnim algoritmom broj ONU uređaja smanjuje tako da su svi bežični usmjernici spojeni sa njima primarnim ONU uređajima. U ćelijama u kojima nisu prisutni bežični usmjernici ONU uređaji nisu potrebni. Korištenjem genetičkog algoritma se nalazi najbolji položaj preostalih ONU uređaja unutar njima pripadajućih ćelija i dalje se smanjuje broj ONU uređaja kako bi se osigurala ekonomična mreža [23]. ONU uređaji mogu komunicirati samo sa bežičnim usmjernicima koji se nalaze unutar njihove ćelije.

Za razliku od gore spomenutih algoritama, slijedeći predloženi algoritam obuhvaća i duljinu optičkog kabela na dionici od ONU do OLT uređaja, kao i moguću interferenciju među bežičnim korisnicima [3]. Predloženi heuristički algoritam uniformno razmješta bežične AP uređaje (ili bazne stanice u slučaju mobilnih mreža), te točno određuje radijus prijenosa (doseg), te dodjeljuje kanale pojedinom uređaju na način da vrijednost omjera nosioca signala i interferencije nikada ne padne ispod minimalne dozvoljene granice. Nakon određivanja položaja AP, algoritam određuje i broj ONU uređaja nužnih za zadovoljavanje kvalitete usluge za pojedini AP, te ih raspoređuje na određenom području koristeći prije spomenuti pohlepni algoritam. Nakon svega navedenog algoritam pronalazi najoptimalniju topografiju za polaganje optičkog vlakna od OLT uređaja do svih ONU uređaja.

Na sličnom tragu poviše spomenutog algoritma postoje i algoritmi koji podrazumijevaju korištenje WiMAX tehnologije u bežičnom segmentu, međutim WiMAX nije u užem fokusu ovog rada. Usporedbe pojedinih algoritama optimalnog planiranja položaja ONU uređaja su prikazane u tablici 3.

Tablica 3. Usporedbe pojedinih algoritama optimalnog planiranja položaja ONU uređaja

ALGORITAM	KVALITETA	PREDNOSTI	OGRANIČENJA
Nasumičan algoritam	Lošija	Jednostavan	Nema odgovarajuće veze među usmjernicima
Deterministički algoritam	Bolja	Pogodan za simetrične mreže	Nepogodna za nesimetrične mreže
Pohlepni algoritam	Dobra	Manja potreba za procesuiranjem	Nije globalno optimalan
Algoritam simuliranog prekaljivanja	Bolja u odnosu na pohlepni algoritam	Optimiziran	Ne osigurava ekonomičnost
Algoritam pozicioniranja ONU uređaja za uravnoteženo opterećenje	Bolja	Minimalan broj ONU uređaja	Manje optimalan od algoritma tabu pretraživanja
Algoritam tabu pretraživanja	U većini slučajeva optimalna	Bolje performanse	Ne minimizira broj ONU uređaja
Hibridni algoritam i genetički algoritam	Odlična	Ekonomična mreža s min. brojem ONU uređaja	-

Također u literaturi je moguće pronaći i tzv. RALA algoritam (eng. *Recursive Allocation and Location Algorithm*) na temelju kojega se uz pomoć rekurzivnih metoda rješava problem optimalnog smještanja ONU uređaja [26]. Uz navedeni algoritam također je predstavljena i općenita opcija optimalnog planiranja položaja ONU uređaja korištenjem algoritma sektoriranja (ravnomjerne raspodijele  $S_r$  ONU uređaja po sektorima (po uvjetom da predmetno područje čini zatvorenu kružnicu), pri čemu  $S_r$  označava faktor dijeljenja djelitelja (1:16, 1:32, itd...) [26].

## 4.2 Optimalno planiranje PON mreže

U svrhu optimalnog planiranja PON mreže koja obuhvaća više stotina ONU uređaja, kao rješenje koje zadovoljava vrijeme obrade podataka te ujedno daje i zadovoljavajuće rezultate, predlaže se tzv. RARA algoritam (eng. *Recursive Association and Relocation Algorithm*) [27]. Često se kao metoda planiranja PON mreže koristi i sektoriranje područja na kojem se planira instalacija ONU uređaja. Međutim RARA algoritam daje bolje rezultate, te uzima u obzir i stvarna ograničenja s kojima se treba susresti prilikom planiranja PON mreže kao što su maksimalni doseg mreže, maksimalna međusobna udaljenost ONU uređaja, te maksimalni faktor dijeljenja PON mreže (1:16, 1:32, 1:64, itd...) [27]. Kao što je već više puta spomenuto najveći troškovi izgradnje nove PON mreže otpadaju na troškove građevinskih radova i materijala prilikom polaganja optičkih kabela.

Matematička formulacija optimalnog planiranja PON mreže se može prikazati izrazom (2) [27]:

$$\alpha \sum_{i \in S} \Phi_i + \beta \sum_{i \in S} \sum_{k \in T_s} \Phi_i T_k \pi_i^k + (\gamma + \theta) \times \left( \sum_{i \in S} \Phi_i l_i^s + \sum_{i \in S} \sum_{j \in U} \Psi_{i,j}^j \right) \quad (2)$$

Prilikom čega  $\alpha$  predstavlja faktor troška OLT uređaja,  $\phi_i$  indikator rada djelitelja u binarnom obliku (0 = djelitelj nije u funkciji, 1 = djelitelj u funkciji),  $\beta$  faktor troška svakog pojedinog

izlaza iz djelitelja,  $T_k$  ukupni broj izlaznih portova djelitelja (8, 16, 32, 64, itd...),  $\pi_i^k$  označava tip djelitelja,  $\gamma$  faktor troška radova iskopa i polaganja optičkog kabela (po km),  $\theta$  faktor troška materijala optičkog kabela,  $l_i^s$  udaljenost djelitelja od OLT uređaja,  $\psi_i^j$  indikator veze između j-tog ONU uređaja sa i-tim izlaznim sučeljem djelitelja, te, na kraju,  $l_i^j$  udaljenost ONU uređaja od djelitelja. Iz navedenog vidljivo je da se formulacija može podijeliti u tri dijela: prvi dio koji je vezan za planiranje OLT uređaja, drugi dio predstavlja trošak djelitelja u mreži, te treći dio trošak radova i materijala iskopa i polaganja optičkih kabela.

Ovakva formulacija ima i određena ograničenja kako bi osigurala vezu sa stvarnim izazovima prilikom planiranja PON mreže [27]:

- 1) Svaki ONU uređaj koji je u funkciji mora biti spojen na djelitelj
- 2) Broj izlaznih sučelja na djelitelju mora biti minimalan, ali mora obuhvatiti sve ONU uređaje u mreži
- 3) Udaljenosti između djelitelja i pojedinog ONU uređaja, kao i udaljenosti između pojedinog djelitelja i OLT uređaja su nelinearni, te je samim time cijeli optimizacijski model nelinearan.
- 4) Mora se poštovati ograničenje maksimalnog doseg a između OLT uređaja i djelitelja, kao i udaljenost između djelitelja i najudaljenijeg ONU uređaja pri tom njihov zbroj ne smije prelaziti maksimalni dozvoljeni doseg PON mreže
- 5) Mora se poštovati i ograničenje maksimalne međusobne udaljenosti ONU uređaja

Model se sastoji od tri koraka. Prvo se definira potreban broj PON mreža (količina djelitelja u mreži), potom povezivanje pojedinog djelitelja sa planiranim ONU uređajima (rješava se kroz tzv. MILP (eng. *Mixed Integer Linear Programming*) model i, zadnje, pozicioniranje djelitelja za što optimalniju izvedbu mreže (definira se kao problem Fermat-Weber položaja središnje točke).

Za rješavanje prije spomenutog modela mogu se koristiti dva heuristička modela nasumično sektoriranje i RARA algoritam. Nasumičnim sektoriranjem se nastoji podijeliti ravnomjerno PON mrežu da bi se ostvarilo maksimalno iskorištavanje izlaznih sučelja na djeliteljima. Nakon navedenog se koristi Weiszfeldov algoritam za definiranje optimalne pozicije djelitelja [27]. Svi ONU uređaji koji se definiraju u istoj grupi se zatim povezuju na zajednički djelitelj. RARA algoritam s druge strane, uzima u obzir i poviše navedena ograničenja. RARA algoritam za definiranje optimalne PON mreže se sastoji od slijedećih koraka [27]:

- 1) Inicijalno nasumično raspoređivanje djelitelja definira početni komplet djelitelja koji ima vrijednost od  $S_{min}$  do  $S_{max}$ , pri čemu  $S_{min}$  definira minimalan broj djelitelja u mreži potreban za povezivanje svih ONU uređaja, a  $S_{max}$  ukupan broj ONU uređaja (pretpostavka da je potreban 1 djelitelj za 1 ONU uređaj). Za svaku pojedinu veličinu kompleta djelitelja nasumično se generira parametar  $N$  različitih početnih položaja djelitelja te se dobiva  $N(S_{max}-S_{min}+1)$  inicijalnih kompleta (kombinacija) djelitelja koje se uzimaju kao početne točke algoritma.
- 2) Za svaku predloženu kombinaciju položaja djelitelja se provjerava jesu li u skladu sa predefiniranim ograničenjima

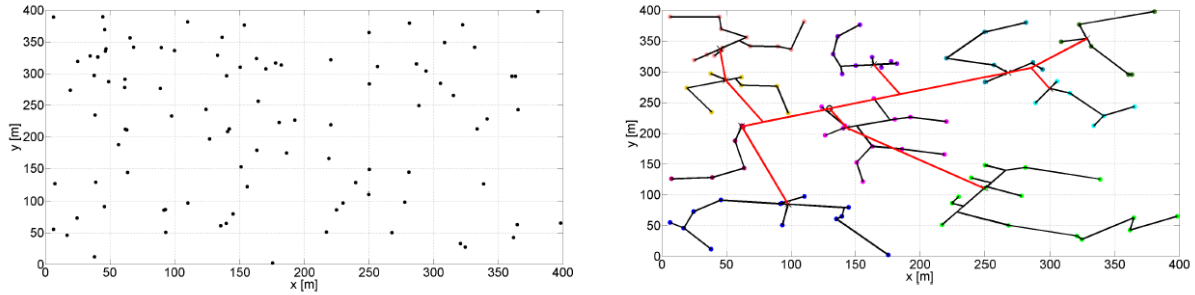
- 3) Treći korak obuhvaća rekurzivni proces kojim se od svih kombinacija djelatitelja odabire ona kombinacija koja podrazumijeva najoptimalniji položaj i najmanju količinu djelatitelja.
- 4) Optimalno povezivanje pojedinog ONU uređaja na djelatitelj na temelju predefiniраниh ograničenja. Na temelju položaja djelatitelja moguće je primjenom MILP modela pronaći optimalno rješenje. Prvo se traži par ONU-djelatitelj sa najmanjom udaljenosti. Potom se na taj par primjenjuju sva ograničenja: maksimalni doseg, maksimalna međusobna udaljenost ONU uređaja te maksimalni omjer dijeljenja. Ukoliko je promatrani par zadovoljio predefiniрана ograničenja prelazi se na idući par s najmanjom udaljenosti te se također provjerava zadovoljava li i taj par ograničenja. Ovakav proces se ponavlja sve dok svaki pojedini ONU uređaj se ne poveže sa njemu najbližim djelatiteljem.
- 5) Nakon što se definira koji ONU uređaj pripada kojem djelatitelju, tj. nakon što se definiraju pojedini elementi PON mreže traži se najoptimalniji položaj ONU uređaja, tj. traži se Fermat-Weber točka poligona koji je omeđen setom ONU uređaja i OLT-om kao vrhovima poligona. U literaturi je Weiszfeldov algoritam predložen kao rješenje pronalaska središnje točke [27]. Nakon što se kao rezultat dobije navedena točka, odmah se provjeravaju granični uvjeti, tj. je li navedena točka zadovoljava ograničenja maksimalnog dosega PON mreže te maksimalne dozvoljene međusobne udaljenosti ONU uređaja.
- 6) Nakon odrađenih prethodnih koraka provjerava se trošak mreže. Ukoliko je trošak mreže nakon pojedine iteracije manji od, do tada, definiranog najmanjeg troška tada se mreža ažurira na novo stanje. Ukoliko dvije iteracije daju gotovo identične troškove tada kažemo da je proces pretraživanja konvergirao, te se proces vraća na prethodne korake i čeka procjena troška mreže za iduće kombinacije. Ukoliko proces nikada ne konvergira, čak ni kada se odrade sve moguće iteracije uvodi se algoritam simuliranog prekaljivanja za pronalazak optimalne arhitekture PON mreže. Ovaj algoritam tijekom cijelog procesa pamti dvije varijable: zapamćenu te promatranu. Ukoliko je promatrana varijabla manje vrijednosti od zapamćene, najpovoljnije, mreža se ažurira na novo stanje. Proces se ponavlja dok se algoritam ne provede za svaku kombinaciju.

Uspoređujući nasumično sektoriranje i RARA algoritam može se zaključiti da RARA algoritam zahtjeva manje ONU uređaja u arhitekturi, samim time ostvaruje i manju trošak po korisniku [27]. S druge strane i za jedan i za drugi heuristički algoritam djelatitelji s omjerom dijeljenja 1:16 ili 1:32 se pokazuju kao najoptimalniji, tj. djelatitelji s većim ili manjim omjerom dijeljenja ne osiguravaju manji ukupni trošak mreže [27]. Kada govorimo o trećem početnom ograničenju mreže, tj. o maksimalnoj međusobnoj udaljenosti ONU uređaja može se zaključiti da ta udaljenost ne utječe značajno na smanjenje troškova mreže [27]. Ovo je logičan zaključak, jer se može pretpostaviti da se korisnici koji pripadaju jednoj PON mreži nalaze u blizini jedan drugog. Jedino ograničenje je maksimalni doseg mreže.

Jedan od parametara koji definira ekonomsku isplativost pojedinog modela mreže je omjer izgradnje i instalacije PON mreže te planirane količine samog optičkog kabela, čija se vrijednost najčešće kreće između 20 i 80 [28]. Na temelju ovog parametra postoji i drugi prijedlog algoritma za optimalno planiranje izgradnje PON mreže naziva kutno ponderirani algoritam (eng. *Angle Weighted Algorithm*) [28]. Ovaj algoritam se sastoji od dva pod-

algoritma: pod-algoritma za uparivanje optičkih kabela te pod-algoritma za isključivanje udaljenih točaka. Predloženi algoritam se sastoji od slijedećih koraka [28]:

- 1) U prvom koraku se definiraju koordinate svih  $n$  krajnjih točaka, te koordinate centrale (lijevo na slici 12).
- 2) Drugi korak podrazumijeva primjenu Delaunayeve triangulacije da bi se promatrano polje podijelilo po trokutima na način da se dobiju sve kombinacije unutarnjih kutova
- 3) Treći korak se sastoji od algoritma klasterizacije metodom  $k$ -srednjih vrijednosti za dobivanje podskupova pojedinih krajnjih korisnika. Na ovaj način topologija se može podijeliti na nekoliko višestupanjskih topologija definiranih pojedinim klasterima i njihovim središtima.
- 4) U četvrtom koraku se primjenjuje kutno ponderirani algoritam za pronalazak koordinata središta zvjezdane topologije pojedinih klastera. Za svaki klaster se provjerava broj krajnjih korisnika te se računa euklidova udaljenost između središta pojedinog klastera i njegovih krajnjih točaka. Ukoliko određeni broj krajnjih točaka premašuje predefiniranu dozvoljenu maksimalnu vrijednost euklidske udaljenosti potrebno je povećati broj klastera te ponoviti korak 3.
- 5) U petom koraku se određuje središte minimalne zvjezdane topologije za svaki klaster te se primjenjuje pod-algoritam za isključivanje udaljenih točaka [28]. Ovaj pod-algoritam prvo definira najudaljenije krajnje točke od središta pojedinog klastera, te uspoređuje tu udaljenost sa predefiniranom maksimalnom dozvoljenom. Ukoliko je udaljenost pojedine točke veća od predefinirane, ta ista točka se povezuje sa prvom susjednom točkom, te se ne uzima u obzir pri slijedećim računanjima. Nakon navedenog ponovno se računa (novo) središte minimalne zvjezdane topologije za promatrani klaster, ali se sada izbacuje iz proračuna udaljena točka koja je sparena sa susjednom. Ovaj pod-algoritam se ponavlja dok sve udaljene točke nisu eliminirane.
- 6) U šestom koraku se primjenjuje pod-algoritam za uparivanje optičkih kabela. Ovaj pod-algoritam funkcionira na način da se odredi optimalan pravac unutar pojedinog klastera za kojeg je zbroj euklidskih udaljenosti od svih  $n$  krajnjih korisnika (unutar tog klastera) u odnosu na projicirani pravac minimalan. Nakon toga se računaju projekcije svih  $n$  krajnjih korisnika prema pravcu na način da se osigura minimalna udaljenost originalnih točaka i njihovih projekcija na pravcu. Potom se odabire središte tog projiciranog pravca kao točka u kojoj se planira položaj sekundarnog djelatnika nadležnog za taj klaster. Ukoliko je euklidska udaljenost između neke dvije točke kraća od predefinirane minimalne vrijednosti te se dvije točke sparuju u jednu točku.
- 7) Sve sparene točke unutar pojedinih klastera se u sedmom koraku povezuju sa sekundarnim djelatnicima nadležnim za taj klaster.
- 8) U osmom, posljednjem, koraku povezuju se središta (sekundarni djelatnici) svih klastera koristeći pod-algoritam uparivanja optičkih kabela. Nakon toga se odabire položaj centralnog djelatnika (primarni djelatnik, odgovoran za cijelo promatrano područje) u središtu projiciranog pravca te se na spomenuti primarni djelatnik povezuju svi sekundarni djelatnici (crvena linija na slici 12).



Slika 12 Primjer kutnog ponderiranog algoritma koji koristi klasterizaciju promatranog polja te pod-algoritme uparivanja optičkih kabela i isključivanja udaljenih točaka. Na slici lijevo je nasumičan položaj 96 korisnika unutar područja, a na slici desno planirana, optimalna PON mreža nakon upotrebe algoritma.

### 4.3 Optimizirano planiranje bežičnog segmenta mreže

Optimalno dizajnirana hibridna optičko-bežična arhitektura podrazumijeva i optimalnu izgradnju bežičnog segmenta. U tekstu poviše su navedeni načini planiranja optimalnog položaja ONU uređaja kao sastavnog dijela PON mreže. Upravo ONU uređaji su sučelja između bežičnog i optičkog segmenta hibridne arhitekture. Na taj način rješavanjem problema optimalnog planiranja broja i položaja ONU uređaja dobivaju se ulazni podaci i za optimalno planiranje položaja i broja potrebnih bežičnih uređaja, u ovisnosti o primijenjenoj tehnologiji (WiFi, WLAN, WiMAX, LTE, itd...).

#### 4.3.1 Optimizirano planiranje heterogenih bežičnih mreža

Prednosti heterogenih mreža su navedene u odjeljku 2.2.2, te predstavljaju interesantan model za definiranje optimalnog planiranja bežičnog segmenta mreže. Jedan od algoritama za ekonomično planiranje heterogene mreže je i  $O(\log R)$  aproksimacijski algoritam, gdje  $R$  predstavlja maksimalnu ostvarenu prijenosnu brzinu bazne postaje [32]. Kao preduvjet ovog algoritma prvo se definira optimiziranje propusnog pojasa ( $b_{k,n}$ ) i alokacije snage ( $p_{k,n}$ ) svih baznih postaja (definiranih skupom  $\mathcal{N}'$ ), kako bi se definirao maksimalan broj potrebnih baznih postaja, a u isto vrijeme zadržala zadovoljavajuća brzina ( $r_{k,n}$ ) za svaki korisnički čvor (definiran skupom  $\mathcal{K}$ ) dana izrazom (3) [32]:

$$\max_{b_{k,n}, p_{k,n}} \sum_{n \in \mathcal{N}'} \sum_{k \in \mathcal{K}} r_{k,n} \quad (3)$$

pri čemu se ostvariva (realna) brzina prijenosa pojedine bazne postaje  $BS_n$  prema korisničkom čvoru  $k$  može prikazati kao:

$$r_{k,n} = b_{k,n} \log_2 \left( 1 + \frac{p_{k,n} |h_{k,n}|^2}{\Gamma N_0 b_{k,n}} \right) \quad (4)$$

gdje  $\Gamma$  predstavlja SNR (omjer signal-šum; eng. *Signal-to-Noise Ratio*) razmak koji je povezan sa danim BER (eng. *Bit Error Ratio*) koeficijentom za pojedinu modulaciju/demodulaciju,  $N_0$  je spektralna gustoća snage bijelog Gaussovog šuma (*AWGN – Additive White Gaussian Noise*), te, konačno,  $h_{k,n}$  koji predstavlja pojačanje kanala između bazne postaje BS $n$  i korisničkog čvora  $k$ . Za svaku makro baznu postaju  $n \in \mathcal{N}'_m$  vrijede izrazi (5) i (6) za maksimalan propusni pojas i snagu:

$$b_n = B - \sum_{k \in \mathcal{K}} b_{k,n} - \sum_{\substack{n' \in \mathcal{M}'_n \\ k \in \mathcal{K}_n}} \gamma_{n'} b_{k,n'}, \quad (5)$$

$$p_n = P_n^{max} - \sum_{k \in \mathcal{K}} p_{k,n} - \sum_{\substack{n' \in \mathcal{M}'_n \\ k \in \mathcal{K}_n}} \gamma_{n'} p_{k,n'} \quad (6)$$

gdje je  $B$  ukupni propusni pojas,  $P_n^{max}$  maksimalna snaga pojedine bazne postaje  $n$ ,  $\gamma_{n'}$  udio potrošnje resursa u *backhaul* dijelu releja  $n'$ , a  $b_{k,n}$  i  $p_{k,n'}$  predstavljaju propusni pojas i snagu na vezi relej - korisnički čvor [32]. Za svaki  $n \in \mathcal{N}'$  vrijedi:

$$b_n = B - \sum_{k \in \mathcal{K}} b_{k,n}, \quad (7)$$

$$p_n = P_n^{max} - \sum_{k \in \mathcal{K}} p_{k,n}. \quad (8)$$

dok je za svaki korisnički čvor  $k \in \mathcal{K}$  ostvariva (realna) brzina prijensa:

$$r_k = R_k^{min} - \sum_{n \in \mathcal{N}'} r_{k,n}. \quad (9)$$

pri čemu  $R_k^{min}$  predstavlja potrebnu brzinu prijensa za korisnički čvor  $k$ .

Ukoliko se uzme da je  $\mathcal{N}_1$  podskup skupa baznih postaja  $\mathcal{N}$ , a  $w(\mathcal{N}_1)$  optimalna vrijednost izraza (3), te  $c(\mathcal{N}_1)$  predstavlja ukupan trošak  $\mathcal{N}_1$ , za svaki podskup  $\mathcal{N}_2$  se može definirati:

$$w_{\mathcal{N}_1}(\mathcal{N}_2) = w(\mathcal{N}_1 \cup \mathcal{N}_2) - w(\mathcal{N}_1). \quad (10)$$



$$W_{\mathcal{N}_1}(\mathcal{N}_2) = \frac{w_{\mathcal{N}_1}(\mathcal{N}_2)}{c(\mathcal{N}_2)} \quad (11)$$

U posebnim slučajevima kada je nadležna makro bazna postaja van područja  $\mathcal{N}_z$ , a  $n$  predstavlja relejni uređaj tada je  $w_{\mathcal{N}_z}(\{n\}) = 0$  [32].

Osnova aproksimacijskog algoritma sastoji se od koraka u kojem se odabire pojedina bazna postaja kao kandidat za maksimalno povećanje kapaciteta sustava uz istovremeno minimalni trošak, tj. odabire se bazna postaja koja omogućuje maksimalan kapacitet po jedinici troška izgradnje. Matematički bi se algoritam mogao prikazati kao skup baznih postaja  $G_l$  koji u  $l$ -toj iteraciji algoritma zadovoljava:

$$W_{\mathcal{N}_{l-1}}(G_l) \geq \max_{\substack{n \in \mathcal{N}_m \setminus \mathcal{N}_{l-1} \\ G \subseteq \mathcal{M}_n}} W_{\mathcal{N}_{l-1}}(\{n\} \cup G), \quad (12)$$

$$W_{\mathcal{N}_{l-1}}(G_l) \geq \max_{n \in \mathcal{N}_p \setminus \mathcal{N}_{l-1}} W_{\mathcal{N}_{l-1}}(\{n\}), \quad (13)$$

$$W_{\mathcal{N}_{l-1}}(G_l) \geq \max_{\substack{n \in \mathcal{N}_m \cap \mathcal{N}_{l-1} \\ G \subseteq \mathcal{M}_n \setminus \mathcal{N}_{l-1}}} W_{\mathcal{N}_{l-1}}(G), \quad (14)$$

gdje  $\mathcal{N}_z$  predstavlja sve odabrane bazne postaje u  $l$ -toj iteraciji. Dakle, svakom iteracijom se ispituju preostale bazne postaje (piko, makro bazne postaje i releji). Ovakav proces se ponavlja dok se ne zadovolje zahtjevi svih korisničkih čvorova za propusnom brzinom. Tada skup preostalih baznih postaja predstavlja optimalno rješenje [32]. Ovaj algoritam je definiran aproksimacijskim faktorom  $O(\log R)$  za minimalan trošak planiranih ćelija, koji je definiran sa:

$$\min_{z_n, p_{k,n}, b_{k,n}} \sum_{n \in \mathcal{N}} c_n z_n \quad (15)$$

Gdje su:

$$R = \max \left\{ \max_{n \in \mathcal{N}_m} w(\mathcal{N}_n), \max_{n \in \mathcal{N}_p} w(\{n\}) \right\} \quad (16)$$

$$z_n = \begin{cases} 1 & \text{BS } n \text{ je u funkciji} \\ 0 & \text{inače} \end{cases} \quad \forall n \in \mathcal{N}.$$

Ukupna brzina prijenosa za baznu postaju  $BS_n$ , pri čemu je  $n \in \mathcal{N}$  je:

$$R_n^* = \begin{cases} \sum_{k \in \mathcal{K}} r_{k,n}^* + \sum_{n' \in \mathcal{M}_n^*} \sum_{k \in \mathcal{K}} r_{k,n'}^*, & n \in \mathcal{N}_m^*, \\ \sum_{k \in \mathcal{K}} r_{k,n}^*, & \text{inače} \end{cases} \quad (17)$$

Ukoliko  $a_l(n)$  predstavlja preostalu brzinu prijenosa koja bi morala biti obuhvaćena sa  $R_n^*$  u  $l$ -toj iteraciji, te se doda bazna postaja  $BSn$  u skup  $\mathcal{N}_l$  (uz BS se dodaju i njoj pripadajući releji) tada vrijedi [32]:

$$a_l(n) \leq \begin{cases} w_{\mathcal{N}_l}(\mathcal{N}_n^*), & \forall n \in \mathcal{N}_m^* \setminus \mathcal{N}_L, \\ w_{\mathcal{N}_l}(\{n\}), & \forall n \in \mathcal{N}_p^* \setminus \mathcal{N}_L, \\ w_{\mathcal{N}_l}(\mathcal{M}_n^* \setminus \mathcal{N}_l), & \forall n \in \mathcal{N}_m^* \cap \mathcal{N}_L. \end{cases} \quad (18)$$

U  $l$ -toj iteraciji vrijedi:

$$W_{\mathcal{N}_{l-1}}(G_l) \geq \frac{a_{l-1}(n)}{c(\mathcal{N}_n^*)}, \quad (19)$$

za svaku baznu postaju BS  $n \in \mathcal{N}_n^*$ , gdje  $\mathcal{N}_n^*$  predstavlja skup makro baznih postaja  $n$  sa njima pripadajućim relejnim uređajima koji su optimalno rješenje. Slično rješenje je i za piko bazne postaje  $n' \in \mathcal{N}_p^*$ , gdje  $\mathcal{N}_p^*$  predstavlja skup piko baznih postaja:

$$W_{\mathcal{N}_{l-1}}(G_l) \geq \frac{a_{l-1}(n')}{c_{n'}}, \quad (20)$$

Trošak bazne postaje BS  $n$  u  $\mathcal{N}^*$  pri  $l$ -toj iteraciji je:

$$c_l(n) = \frac{a_{l-1}(n) - a_l(n)}{W_{\mathcal{N}_{l-1}}(G_l)} \quad (21)$$

Pri čemu za  $\mathcal{N}_n^*$  ukupni trošak za makro baznu postaju  $BSn$  i piko baznu postaju  $BSn'$  vrijedi [32]:

$$\sum_{l=1}^L c_l(n) \leq c(\mathcal{N}_n^*) \cdot O(\log R) \quad (22)$$

$$\sum_{l=1}^L c_l(n') \leq c_{n'} \cdot O(\log R), n' \in \mathcal{N}_p^* \quad (23)$$

Na temelju gornjih izraza (22) i (23) ukupni izraz za optimiziran trošak bežičnog segmenta mreže, koji se sastoji od skupa  $\mathcal{N}_L$  kojim su obuhvaćene optimalne količine makro i piko baznih postaja te releja, a na temelju predloženog algoritma, prikazan je formulacijom (24) [32]:

$$c(\mathcal{N}_L) \leq O(\log R) \cdot c(\mathcal{N}_m^* \cup \mathcal{N}_p^* \cup \mathcal{N}_r^*) \quad (24)$$

U literaturi je također moguće pronaći usporedbu troškova mreže koja se sastoji od samo makro ćelija te kombinirane mreže koja se sastoji od femto i makro ćelija [33]. Femto ćelije su interesantne kao *indoor* rješenja, tj. za omogućavanje bežične mreže u zatvorenim prostorijama zgrada te se pokazuju posebno isplativima u urbanim područjima. U tehn-ekonomskom smislu femto ćelije pokazuju određene benefite koji se ostvaruju pri manjim propusnim pojasevima, te se ostvaruju i veće uštede kada se femto ćelije ne smatraju dijelom mreže operatera, već su investicija samog korisnika [33]. Troškovi kapitalnih ulaganja (CAPEX) za hibridne mreže koje se sastoje od makro i femto ćelija se mogu prikazati izrazom:

$$\text{CAPEX}^{(i)} = \sum_j M_j^{(i)} c_j^{\text{capex}} \left(1 + p_j^{\text{capex}}\right)^{i-1} \quad (25)$$

gdje  $M_j^{(i)}$  predstavlja broj uređaja  $j$  kupljenih u godini  $i$ ,  $c_j^{\text{capex}}$  predstavlja jediničnu cijenu elementa mreže  $j$ , a  $p_j^{\text{capex}}$  promjenu cijene tog elementa tijekom nekog perioda (u godinama) [33].

Prilikom traženja optimiziranih položaja samih releja može se koristiti algoritam simuliranog prekaljivanja (eng. *Simulated Annealing – SA*) [37]. Potencijalni položaji releja se nalaze na heksagonalnoj mreži koja se pruža duž cijele ćelije. Dva releja se ne mogu istovremeno nalaziti na istom mjestu, te relej ne može biti na centralnom mjestu ćelije (namijenjeno baznoj postaji). U prvom koraku algoritma releji se smještaju po gruboj mreži, gdje je razmak između potencijalnih položaja releja (sjecišta na heksagonalnoj mreži) nešto veći. Tijekom druge faze algoritma taj razmak je manji. Smanjivanje razmaka predstavlja prednost jer omogućava brže traženje optimiziranog položaja [37]. SA algoritam se zaustavlja ukoliko je nakon dvije uzastopne sekvence procjena prihvatljivosti jednaka nula, jer se smatra da je sustav dostigao stabilno stanje [37].

Heterogene mreže (*HetNets*) se nameću kao ekonomično rješenje za bežične mreže velike prijenosne brzine u odnosu na bežične mreže u kojima se planiraju samo makro bazne postaje. Ukoliko je omjer prosječne cijene piko bazne postaje u odnosu na makro baznu postaju 1:10 tada je prosječni trošak heterogenih mreža (*HetNets*) barem 50% niži u odnosu na bežične mreže u kojima se koriste samo makro bazne postaje (za slučaj omjera 1:5, prosječni trošak HetNet mreže je 20% niži), pri tom ovi postoci ne ovise o potrebnoj prijenosnoj brzini korisničkih čvorova, kao ni o broju korisničkih čvorova (iako se njihovim povećavanjem apsolutni iznosi troškova naravno povećavaju) [32]. HetNet mreže tako predstavljaju najbolja rješenja za povećavanje kapaciteta bežične mreže nove generacije.

#### 4.3.2 Optimizirano planiranje isprepletenih bežičnih mreža

Ukoliko se uzme da je:

$c_j$  – trošak instaliranja MR (eng. *Meshed Router*) uređaja na kandidacijskom mjestu (CS)  $j \in S$ , pri čemu  $S$  predstavlja skup svih mogućih točaka na kojem se može planirati položaj uređaja

$p_j$  – trošak instaliranja MAP (eng. *Meshed Access Point*) uređaja na kandidacijskom mjestu (CS)  $j \in S$

$$z_j = \begin{cases} 1 & \text{ukoliko su MAP ili MR instalirani na CS } j \\ 0 & \end{cases}$$

$$w_{jN} = \begin{cases} 1 & \text{ukoliko je MAP instaliran na CS } j \\ 0 & \text{inače} \end{cases}$$

tada se osnovni cilj optimalnog planiranja WMN mreža može prikazati formulacijom (26) [35]:

$$\min \sum_{j \in S} (c_j z_j + p_j w_{jN}) \quad (26)$$

U pojedinim slučajevima nema potrebe za MAP uređajem u mreži pa je sami trošak instalacije  $p_j$  jednak 0. Ovaj izraz mora zadovoljavati i nekoliko ograničenja poput onih da je ukupni promet (a ujedno i iskorištenje resursa) jednak zbroju toka prometa od korisničkog uređaja  $j$  prema drugom uređaju  $l$  ( $f_{jl}$ ) i obrnuto ( $f_{lj}$ ) te prometa do *backbone* mreže  $f_{jN}$  [35]. Radio resursi se, dakle, dijele u oba smjera (odlazni i dolazni). Ukupni promet na nekom korisničkom uređaju ne smije prijeći kapacitet veze (eng. *linka*)  $u_{jl}$ . Također, samo MAP uređaj ima žičnu vezu sa *backbone* mrežom ukupnog kapaciteta  $M$ . Za ovakav bežični distributivni sustav dovoljno je omogućiti da parametri kapaciteta bežične veze između  $j$  i  $l$ ,

$u_{jl}$ , ovise o propagacijskim uvjetima između kandidacijskih položaja  $j$  i  $l$ . Na temelju predodređenih podataka o broju i položaju kandidacijskih točaka i korisničkih uređaja, kvaliteta WMN mreža te ukupni troškovi instalacije ovise o dva parametra: korisničkog prometnog zahtjeva  $d$  te omjera troška instaliranja između MR i MAP uređaja  $\beta$  [35].

Porastom prometnih zahtjeva  $d$  broj instaliranih MAP uređaja također raste kako bi se osigurao promet od korisničkih uređaja prema žičnom dijelu arhitekture [35]. S druge strane, broj MR uređaja i bežičnih veza je gotovo isti bez obzira na promjenu prijenosne brzine. Ukupni kapacitet mreže je većinom limitiran kapacitetom veze MAP – žična *backbone* mreža. Ukoliko se postavi da je kapacitet te veze  $M$  beskonačan tada broj MAP uređaja ostaje fiksna, a povećava se broj MR uređaja uslijed zahtjeva za porastom prijenosne brzine [35]. U slučaju kada je zahtijevana prijenosna brzina fiksna vrijednost  $d$ , tada se povećavanjem broja kandidacijskih točaka također povećava vjerojatnost da je mobilni klijent (eng. *Mobile Client* – *MC*) povezan sa MAP uređajem preko više koraka (*hopova*) na bežičnoj trasi. Dakle sustav teži manjem broju MAP uređaja, a većem broju MR uređaja [35]. S druge strane, za manji broj kandidacijskih točaka potreban je veći broj MAP uređaja s obzirom da ne mogu svi MC uređaji biti povezani na MAP uređaje preko bežičnih putova sa više *hopova* (problem dosega) [35].

Drugi parametar važan za optimiziranu izgradnju WMN mreže je  $\beta$ . Povećavanjem troška instaliranja MAP uređaja u odnosu na trošak instaliranja MR uređaja (manji  $\beta$ ) uzrokuje smanjenje planirane količine MAP uređaja. U obrnutom slučaju (veći  $\beta$ ) vodi ka planiranju što manjeg broja MR uređaja [35].

Ukoliko se na sve navedeno uzme u obzir i utjecaj interferencije na pristupni kapacitet WMN mreže (pretpostavka je da MR i MAP koriste isti radio kanal za pristupni dio te isti radio kanal za vezu prema *backbone* dijelu mreže) tada je potreba za MAP uređajima veća, a broj veza u bežičnom distributivnom sustavu (eng. *Wireless Distribution System* – *WDS*) je manji [35]. Razlog tome je smanjenje dostupnog kapaciteta uslijed moguće interferencije, te su MR i MAP uređaji međusobno povezani sa bežičnim vezama sa manjim brojem *hopova* (kraće su udaljenosti među MR i MAP uređajima). Ovakav model se zove model osjetljiv na interferenciju (eng. *Interference Aware Model* – *IAM*).

Pošto je rješavanje krupnijih IAM modela dosta komplicirano, u literaturi se može pronaći algoritam koji je baziran na linearnoj relaksaciji MIP formulacije [35]. Algoritmom određujemo optimalno rješenje jednostavnije kontinuirane relaksacije IAM modela te iskorištavamo to rješenje za dobivanje korisnih informacija o elementima optimalne strukture IAM modela [35]. Kandidacijska točka predložena IAM modelom je dobivena sa odgovarajućim zaokruživanjem optimalnog rješenja relaksacije IAM modela, gdje sve osim jedne grupe binarnih varijabli mogu imati vrijednosti u obliku razlomka u intervalu  $[0;1]$ . Točan položaj kandidacijskih točaka IAM modela je konačno detaljnije definiran lokalnim promjenama [35]. Algoritam se sastoji od 4 koraka [35]:

- 1) Rješavanje kontinuirane relaksacije IAM modela – varijabla instaliranja MR uređaja  $z_j$  i varijabla dodijele korisničke točke – MR  $x_{ij}$  su u obliku razlomka, a samo varijable MAP instalacije  $w_{jN}$  su u binarnom obliku. U praksi 90%  $z_j$  vrijednosti su binarnog

oblika, te su ostale relaksirane varijable blizu 0 ili 1, tako da sve binarne vrijednosti  $z_j$  predstavljamo ili kao 0 ili kao 1, a ostale zaokružimo na gornjoj ili donjoj granici (0 ili 1).

- 2) Pronalaženje kandidacijskog rješenja rješavanjem relaksacije IAM modela sa  $z_j$  varijablom definiranom u 1. koraku te biranim vrijednostima za  $x_{ij}$  i  $w_{jN}$ . Ovdje će rješenja biti ograničena dostupnim kapacitetom.
- 3) Faza prerade – tri tipa načina prerade se mogu primijeniti za poboljšavanje kandidacijske točke definirane u prethodnom koraku 2. Ove prerade za cilj imaju smanjenje broja MAP uređaja instaliranjem dodatnih MR uređaja za spajanje izoliranih predjela bežičnog distributivnog sustava. Tri koraka su:
  - a. Dodavanje jednog MR uređaja u neki od praznih susjedskih lokacija, te provjeravanje izvedivosti nove arhitekture WMN mreže rješavanjem relaksacije IAM modela sa fiksnom vrijednosti varijable  $z_j$ , binarne vrijednosti  $w_{jN}$ , te razlomka  $x_{ij}$
  - b. Brisanje jednog MR uređaja u kandidacijskim točkama koje su prve na listi po broju instaliranih MR uređaja, te se ponovno provjerava izvedivost.
  - c. Dodavanje  $k$  simultanih MR-ova kao u koraku pod a, samo umjesto jednog MR uređaja, dodaje se  $k$  slučajno odabranih MR uređaja među onima koji se smatraju najboljima.  $K$  vrijednost ovisi o parametru  $\beta$ .
- 4) Provjeravanje izvedivosti rješavanje IAM modela sa fiksnom vrijednosti varijable  $z_j$  nakon faze prerade te su sve vrijednosti  $x_{ij}$  i  $w_{jN}$  binarne.

Ovakva heuristička metoda se pokazala uspješnom za veće arhitekture [35].

Kod modela koji podrazumijevaju korištenje više kanala (eng. *Multiple Channel Model – MCM*) cilj arhitekture predstavljamo sa:

$$\min \sum_{j \in S} (c_j t_j + p_j w_{jN}) \quad (27)$$

gdje su svi parametri identični onima u IAM modelu osim parametra  $t_j$  koji ima vrijednost 1 ukoliko je čvor isprepletene mreže prisutan, inače je vrijednost 0 [35]. MCM model se koristi kod planiranja višekanalnih/više-radijskih WMN mreža samo kad je broj dostupnih kanala i sučelja veoma limitiran [35].

### 4.3.3 Optimizirano planiranje bežičnih lokalnih mreža

Kod WLAN mreža (IEEE 802.11) pristupne točke (eng. *Access Points – AP*) su povezane sa žičnim segmentom mreže, te unutar svog područja pokrivanja direktno komuniciraju s korisničkim uređajima. Za povećavanje doseg pokrivanja moguća je uporaba relejnih čvorova, tako da korisnički uređaji osim što mogu direktno komunicirati s AP-om, mogu i posredno preko releja. AP sa korisničkim uređajima komunicira po principu kružnog dodjeljivanja po pojedinom ciklusu. AP može preko posrednih, relejnih uređaja ostvariti silazni promet prema korisniku, te je također osiguran i uzlazni promet od korisnika do AP-a preko releja. Korištenjem releja isti podaci se moraju prenositi dvaput. Na taj način releji

moгу, a i ne moraju poboljšati komunikaciju korisničkom uređaju. Korisnički uređaj prije prijenosa mora odlučiti hoće li uspostaviti direktnu vezu sa AP-om ili će veza obuhvaćati i relej. Ova odluka je bazirana na očekivanom vremenu prijenosa paketa. Korisnički uređaj će koristiti releje za pojednostavljivanje komunikacije sa AP-om jedino ako ta komunikacija podrazumijeva manje očekivano vrijeme prijenosa paketa [36]. Međutim problem prilikom planiranja pristupne mreže temeljene na WLAN tehnologiji sa većim brojem korisničkih uređaja proizlazi iz činjenice da nije lako u kratkom vremenu dobiti podatak o očekivanom vremenu prijenosa paketa za svaki mobilni uređaj, konfigurirati mrežu na temelju tih podataka, a do trenutka kada konačno takva mreža konvergira uvjeti na mreži se mogu i promijeniti. Pri planiranju takve mreže cilj je da je očekivano vrijeme prijenosa paketa pojedinog releja na  $d$  udaljenosti od AP uređaja i  $\varphi$  kuta između predefinirane referentne linije i linije na kojoj se nalazi položaj releja minimalno [36, 38]:

$$\min_{d, \varphi} \overline{T_{rn}(d, \varphi)} \quad (28)$$

Prilikom planiranja hibridnih optičko-bežičnih uređaja koji koriste WLAN tehnologiju u bežičnom segmentu optimalan položaj AP uređaja je vezan za optimalan položaj ONU uređaja u GPON segmentu (detaljnije u prijašnjim odjeljcima). Za pronalazak najoptimalnijeg položaja za relejni uređaj prvo se neko područje promatranja može podijeliti na  $n$  jednakih dijelova. Svaki kandidacijski položaj na koji se može ugraditi relej se može označiti sa  $1, 2, \dots, n$ , pri čemu ovi indeksi označavaju udaljenost od nadležnog AP uređaja. Potom je moguće pronaći kandidacijsko mjesto  $N$  od svih  $n$ , a za koje vrijedi da je ukupni kapacitet maksimalan [36]. Na temelju karakteristika sustava od 3 releja i 2 releja rekurzivno se može odrediti položaj releja u mreži sa  $N$  releja.

Na temelju četiriju mrežnih parametara može se izvesti optimalno planiranje položaja releja [36, 38]. Ti parametri su *roll-off* faktor  $\alpha$ , udio silaznog prometa  $\beta$ , omjer snage predajnika korisničkog uređaja i snaga predajnika AP-ova i releja, te, konačno, potreban broj releja  $N$  [36, 38]. Utjecaj ovih parametara na planirani optimalan položaj releja se može testirati na dva osnovna modela prijenosa: Shannonov i 802.11g model.

Shannonov model kanala predstavlja idealni model u kojem je brzina prijenosa između predajnika i prijemnika jednaka Shannonovom kapacitetu. Također, podrazumijeva da predajnik uvijek unaprijed zna dozvoljenu brzinu prijenosa te pri tom nema grešaka u prijenosu.

IEEE 802.11g model se predstavlja kao model sa diskretnim vrijednostima brzine prijenosa sa iščezavanjem signala (eng. *fading*), pri čemu prijemnik koristi tzv. vrijeme testiranja u kojem ispituje maksimalnu dozvoljenu brzinu prijenosa prije stvarnog prijenosa. Na temelju testnog prijenosa donosi odluku može li ili ne može pokrenuti prijenos paketa. Ovo dovodi do produženja vremena prijenosa.

Za pojedinačni skup parametara sustava postoje dva različita optimalna položaja za relej na temelju dva modela kanala: na temelju Shannonova modela  $\underline{d}_S = (d_{N,1}^S, \dots, d_{N,N}^S)$  i na temelju IEEE 802.11g modela  $\underline{d}_G = (d_{N,1}^G, \dots, d_{N,N}^G)$  [36]. Prosječna razlika u položajima spomenuta dva modela iznosi (29) [36]:

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|d_{N,i}^S - d_{N,i}^G|}{d_{N,i}^S} \quad (29)$$

Iz ovog izraza se može zaključiti i da povećanjem jednog od prije spomenutih mrežnih parametara (koji utječe na optimalan položaj releja), tj. povećanjem broja releja  $N$ , razlika u optimalnim položajima releja za navedena dva modela se smanjuje.

Jedan od četiri parametra mreže koji može utjecati na optimalan položaj releja jest *roll-off* faktor koji određuje koliko brzo se signal gubi proporcionalno sa putem kojim prolazi. Za visok *roll-off* faktor optimalno raspoređeni releji su raspršeni, te su ti releji namijenjeni za omogućavanje komunikacije udaljenijim (u odnosu na AP) korisnicima [36]. Ovaj zaključak podrazumijeva Shannonov model kanala, jer se za IEEE 802.11g model dobivaju potpuno suprotni zaključci. Međutim, razvojem WLAN tehnologija (IEEE 802.11n) može se uzeti pretpostavka da se brzine prijenosa u WLAN mrežama približavaju Shannonovom maksimalnom kapacitetu kanala.

Na položaj releja utječe također i omjer uzlaznog i silaznog prometa. U slučaju većeg uzlaznog prometa (*eng. Uplink*) generiranog od predajnika korisničkog uređaja, položaj releja je udaljeniji u odnosu na AP, dok silazni promet (*eng. downlink*) nema većeg utjecaja na položaj releja [36]. Razlog ovakvog zaključka leži u činjenici da je snaga predajnika korisničkog uređaja značajno manja nego snaga predajnika releja ili AP uređaja, pa samim tim je logično da se položaj releja planira bliže korisničkom uređaju [36].

## 5. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA HIBRIDNIH OPTIČKO-BEŽIČNIH MREŽA

Ukupni troškovi telekomunikacijske mreže se mogu podijeliti u dvije osnovne kategorije: kapitalna ulaganja (CAPEX) i operativna ulaganja (OPEX). CAPEX ulaganja pokrivaju sve nužne troškove implementiranja nove mreže. Sastoje se od početne mrežne opreme, troškova izgradnje mreže, infrastrukturnih troškova i sustava upravljanja mrežom. OPEX, s druge strane, pokriva troškove rada, administriranja i održavanja mreže (*eng. Operation, administration and maintenance – OAM*). OPEX se može podijeliti na tri potkategorije: početni OPEX troškovi, OAM troškovi postojeće mreže i troškovi nevezani za telekomunikacijsku tehnologiju.

Izazov koji se pojavljuje prilikom predviđanja troškova izgradnje nove hibridne mreže jest odabir tehnologija koje će se koristiti u pojedinom segmentu (optičkom i bežičnom). Prilikom odabira pojedine tehnologije važno je prvo sagledati tip terena na kojem se mreža planira implementirati (urbani, suburbani ili ruralni). Tehno-ekonomski modeli predstavljeni u [3, 18] daju uvid u korake nužne za određivanje ukupnih OPEX i CAPEX troškova. Ovi modeli prvo određuju početnu mrežnu infrastrukturu, zatim tehnike troškovnog modeliranja, te ograničenja planiranih tehnoloških pristupa. Tako prikupljeni podaci dostatni su za izradu troškovno efikasne mreže. Kada se gleda samo optički segment hibridne mreže postoje realno samo dvije mogućnosti EPON ili GPON, dok bežični segment može ponuditi raznolika tehnička rješenja kao što su WiMAX, 3G ili 4G mobilne mreže, WLAN, WMN, itd...



## 5.1 Tehno-ekonomska analiza optičkog segmenta hibridne mreže

U optičkom segmentu za pojedinu EPON/GPON mrežu je odgovoran jedan OLT uređaj. Jedan od modela optimalnog planiranja položaja ONU uređaja pretpostavlja nasumičnu razdiobu ONU uređaja unutar kvadratne ćelije, čije su dimenzije ograničene vrstom terena (urban, suburban ili ruralan), a udaljenosti između planiranih susjednih ONU uređaja su definirani sa  $l_{rural} > l_{suburban} > l_{urban}$ . Položaj OLT uređaja je fiksna, te se kao parametar utvrđivanja ekonomske isplativosti uvodi udaljenost (potrebna duljina svjetlovodnog kabela) između OLT uređaja i ONU uređaja, što je ujedno i najveće ograničenje PON mreže [3, 18].

Količina OLT uređaja potrebnih za pokrivanje nekog područja ovisi o broju planiranih PON mreža. Pojedina PON mreža može opslužiti  $\Omega N/K$  korisnika, što je i definirano sa izrazom (30) [19]:

$$\text{Number of subscribers} = \Omega N / K = \sigma v C / \beta r_0 \quad (30)$$

gdje  $\Omega$  označava širokopojasni pristup ( $0 < \Omega < 1$ ),  $K$  označava broj potrebnih OLT portova,  $\beta$  označava postotak korisnika koji su aktivni tijekom vremena najveće opterećenosti,  $N$  je broj ONU uređaja,  $r_0$  je prosječna propusna brzina potrebna za zadovoljavanje svih usluga na jednom ili svim OLT portovima,  $\sigma$  označava kodnu efikasnost,  $v$  predstavlja iskorištenje kapaciteta prijenosnog kanala, a  $C$  je prijenosni kapacitet [19]. Maksimalan broj pretplatnika koje može podržati jedan port na OLT uređaju je, dakle, definiran sa parametrima  $r_0$  i  $\beta$ .

Broj potrebnih pasivnih djelatnika PON mreže po pojedinoj površini (eng. *splitters per site*)  $N_{SPS}$  je dan kao omjer broja kućanstava sa maksimalnim brojem korisnika koje djelatnik može podržati  $N_{Max}$  [20]:

$$N_{SPS} = (H / N_{MAX}) \quad (31)$$

Potrebna duljina optičkog kabela sa svojom instalacijom čini najveći udio u ukupnom trošku izgradnje mreže po korisniku. S druge strane i OLT portovi značajno sudjeluju u ukupnim troškovima s obzirom na svoju cijenu, te na činjenicu da upravo oni najviše participiraju u potrošnji energije u PON mrežama, pa dijeljenje jednog OLT porta na više korisnika smanjuje troškove ugradnje i potrošnje energije [20]. Ukupna duljina optičkog kabela u PON arhitekturi je dana sa jednadžbom:

$$d_{total} = d_a(i) + n_d d_d(i) \quad (32)$$

gdje  $d_a$  predstavlja duljinu optičkog kabela od OLT uređaja (iz centrale) do PON djelatitelja (dovodni kabel),  $d_d$  predstavlja duljinu distributivnog kabela (od PON djelatitelja do ONU uređaja), a  $n_d$  predstavlja ukupni broj planiranih distribucijskih kablova (u ovisnosti sa omjerom dijeljenja PON djelatitelja, npr. 1:32, 1:64...).

Kada je potrebno odrediti ukupnu duljinu planiranih cijevi treba imati na umu da je ukupna potrebna duljina cijevi  $L_D$  kraća od ukupne duljine optičkog kabela. Razlozi tome mogu biti različiti, od toga da je moguće kroz jednu cijev provući više optičkih kablova istovremeno, pa sve do mogućnosti korištenja zračnih optičkih kablova u pojedinim segmentima planirane trase. Ukupna duljina planiranih cijevi je definirana kao zbroj duljine cijevi u spojnom dijelu  $L_{DF}$  i ukupne duljine cijevi u pristupnoj mreži  $L_{DDr}$ . U ukupnoj duljini planiranih cijevi važan dio otpada na cijevi koje pokrivaju udaljenost između korisnika, tako da se može uvesti faktor  $F_D$  sa vrijednostima između 7% i 10% za prosječnu udaljenost između kuća od otprilike 20m u urbanim područjima [20]:

$$L_D = L_{DF} + L_{DDr} \quad (33)$$

$$L_{DF} = d_a \quad (34)$$

$$L_{DDr} = F_D * d. d. \quad (35)$$

Sada kada su se definirale količine svih potrebnih elemenata optičkog segmenta hibridne mreže moguće je definirati ukupne troškove implementacije GPON mreže na nekom području. Ukupni troškovi  $C_{C(optic)}$  su dani kao suma troškova optičkog kabela  $C_F$ , troška instalacije  $C_I$  i troškova opreme  $C_E$  [20]:

$$C_{C(optic)} = C_F + C_I + C_E \quad (36)$$

$$C_{C(optic)} = C_{OLT} + C_{OLT-RN} + C_{RN} + C_{RN-ONU} + n_{ONU} \cdot C_{ONU} \quad (37)$$

Troškovi optičkog kabela su definirani sa cijenom optičkog kabela po metru i ukupne potrebne duljine:  $C_F = C_f * d_{total}^i$ . Troškovi instaliranja optičke mreže su dobiveni zbrajanjem troškova centrale  $C_{Col}$ , ugradnje zdenaca  $C_M$ , ukupne duljine potrebnih cijevi  $C_D$  i troškova građevinskih iskopa  $C_T$ :

$$C_I = N_{CO}C_{Col} + N_{FS}C_M + N_{SS}C_M + L_D C_D + L_D C_T \quad (38)$$

gdje parametar  $N_{CO}$  predstavlja broj centrala koje pokrivaju promatrano područje,  $N_{FS}$  predstavlja ukupan broj primarnih djelatitelja,  $N_{SS}$  ukupni broj sekundarnih djelatitelja, te  $L_D$

ukupnu duljinu planiranih cijevi. Dodatno troškovi aktivne opreme se mogu predstaviti kao troškovi centrale  $C_{CO}$ , troškovi djelatitelja  $C_S$  i troškovi ONU uređaja [20]:

$$C_E = \Sigma (C_{CO} + C_S) + \Sigma (C_{ONU}) \quad (39)$$

Pri tom u ukupnim troškovima centrale sudjeluju troškovi optičkog distribucijskog okvira (eng. *Optical Distribution frame* – ODF), troškovi šasije  $C_{Ch}$ , te troškovi pločica  $C_{LC}$  (OLT portovi se nalaze na pločicama sa nekoliko portova po pločici, najčešće 2,4 ili 8) [20]:

$$C_{CO} = C_{ODF} + C_{Ch} + C_{LC} \quad (40)$$

Svi ovi gornji izrazi definirali su planirane CAPEX troškove. Kada se govori o OPEX troškovima glavna potrošnja je vezana u potrošnju energije. Za ruralna i suburbana područja jedan djelatitelj predstavlja ekonomično rješenje zbog raštrkanosti korisnika [20]. OLT potrošnja energije je definirana sa (41) [20]:

$$\begin{aligned} P_{OLT} &= (P_{Uplink} + P_{Downlink}) + P_{cooling} = \\ &= (n_{up} \times p_{uplink} + n_{down} \times p_{downlink}) \times (1 + \alpha_{cooling}) \end{aligned} \quad (41)$$

OLT i ONU uređaji tradicionalno troše značajan dio snage, pogotovo OLT uređaji zbog dodatne potrošnje energije za potrebe hlađenja opreme. *Point-to-point* arhitektura ne zahtjeva dodatnu potrošnju energije između centrale i korisničkih lokacija kao što je to slučaj sa *point-to-multipoint* arhitekturama. GPON su tipično *point-to-multipoint* arhitekture, međutim podrazumijeva korištenje pasivnih uređaja, pa samim time dodatno napajanje nije potrebno. S druge pak strane, ovi pasivni elementi imaju utjecaja na snagu signala (gušenje), pa samim time OLT i ONU uređaji troše više energije kako bi generirali optičke signale dovoljne snage za prijenos prema i od korisničke lokacije [6]. Dodatna potrošnja energije se može pojaviti i od strane DSLAM uređaja (eng. *Digital Subscriber Line Access Multiplexer*) smještenog u kabinetu (zaduženog za multipleksiranje i pretvorbu signala iz optičke domene u elektroničku i obratno), koja je tipična za xDSL mreže.

Osim potrošnje energije najveći postotak OPEX troškova otpada na popravke grešaka. Popravci grešaka najčešće obuhvaćaju greške na čvorovima (ONU, OLT, RN) i greške na kablovima [3, 18]:

$$C_{R-EPON} = \sum_{\forall i} [Pr_i \times (\alpha \cdot CAPEX(i))] \quad (42)$$

gdje  $P_{ri}$  označava vjerojatnost greške na čvoru  $i$ ,  $CAPEX(i)$  označava početne troškove uređaja  $i$ , te  $\alpha$  popravak ili faktor zamjene koji je između  $0 < \alpha < 1$  (ukoliko je  $\alpha = 1$  tada je obavljena zamjena umjesto popravka). Stoga, ukupni OPEX troškovi su dani sa (43) [3,18]:

$$O_{GPON} = C(P_{GPON}) + C_{R-GPON} \quad (43)$$

Ukupni OPEX troškovi po pristupnoj površini ( $CA_{op}$ ) za FTTH-GPON arhitekturu su dani sa [6]:

$$CA_{op}^i = n_{area}^i \times (c_{drop} + \frac{c_{CPE}}{5} + \frac{c_{batt}}{5} + c_{pow} + c_{nets} + c_{gens} + c_{genm} + c_{bill} + c_{bad} + c_{prov}) \quad (44)$$

Pri tom  $c_{drop}$  predstavlja troškove instalacije posljednjeg pristupnog kabela,  $C_{CPE}$  troškove korisničke opreme,  $c_{batt}$  troškove rezervnih baterija,  $c_{pow}$  potrošnja energije,  $c_{nets}$  troškovi podrške mreži,  $c_{gens}$  općeniti troškovi podrške,  $c_{genm}$  troškovi općenitog upravljanja,  $c_{bill}$  troškovi uspostave financiranja i naplaćivanja,  $c_{bad}$  ostali troškovi te  $c_{prov}$  troškovi održavanja i *provisioninga* [6]. S obzirom na navedeno može se zaključiti da ukupni troškovi mrežne opreme te troškovi po pretplatniku ovise o količini propusnog pojasa za pojedinog korisnika. Štoviše, oprema te pruženi propusni pojas značajno sudjeluju u ukupnim troškovima implementacije mreže.

Optički segment hibridne mreže se može realizirati sa dva pristupa: GPON i EPON. Iako je GPON oprema nešto skuplja (u usporedbi sa EPON), značajna ušteda u GPON mrežama je jednostavno rezultat većeg omjera GPON djelatnika, PON propusnog pojasa, te efikasnog korištenja propusnog pojasa što znači smanjenje broja OLT uređaja za red veličine od 2 naviše u odnosu na EPON [5]. Kao rezultat u centralama je moguća značajna prostorna i energijska ušteda.

## 5.2 Tehno-ekonomska analiza bežičnog segmenta hibridne mreže

### 5.2.1 LTE mobilne mreže

Konvergirane GPON-LTE mrežne arhitekture uključuju OLT uređaje, pasivne djelatnike, hibridne ONU-eNB uređaje (*Evolved Node B*) te korisničku opremu i terminale [34]. ONU-eNB uređaji imaju jednu kontrolnu ploču koja ima funkciju sakupljanja mrežnih zahtjeva od strane GPON-a i LTE-a, također šalju zahtjeve prema OLT uređaju za potrebama kapaciteta, te prima dodijele redoslijeda pristupa zajedničkom mediju i alokacije propusnog pojasa od

strane OLT uređaja [34]. Operativna ploča je odgovorna za mapiranje prometa za GPON i LTE, a koje je namijenjeno slijedećem ciklusu prijenosa. Ovakva arhitektura smanjuje kapitalna i operativna ulaganja spajajući sve funkcionalne module ONU, eNB uređaja i zajedničkog upravljača (eng. *Join Controller – JC*) na otisnute sklopovne ploče (eng. *Printed Circuit Boards – PCB*) u ONU-eNB uređaju. ONU-eNB uređaj obrađuje dvije grupe protokola: GPON protokol (klasifikator paketa, raspoređivač paketa, te prioretiziranje nizova) i LTE protokol (raspoređivač rekonstruiranja paketa u uzlaznom prometu) [34].

Slično kao i u optičkom segmentu hibridne mreže, bežična mreža također ovisi o vrsti terena i postotku naseljenosti određenog područja. Na temelju navedenog također možemo napraviti podjelu na urbano, suburbano i ruralno područje za koje vrijedi relacija:

$$PL_{urban} > PL_{suburban} > PL_{rural} \quad (45)$$

gdje PL označava bežične gubitke prijenosa između pretplatničke jedinice (eng. *Subscriber station – SS*) te  $L$  metara udaljene bazne stanice (BS) [3, 18].

Veličina ćelije u mobilnim mrežama, u smislu područja pokrivanja i maksimalnog broja korisnika, je dana sa (46) [6]:

$$n_{users} = \frac{Total\ Data\ Throughput}{QoS\ (data\ rate\ per\ user)} = \frac{BW \times Spectral\ Efficiency \times n_{sectors} \times n_{antennas}}{QoS} \quad (46)$$

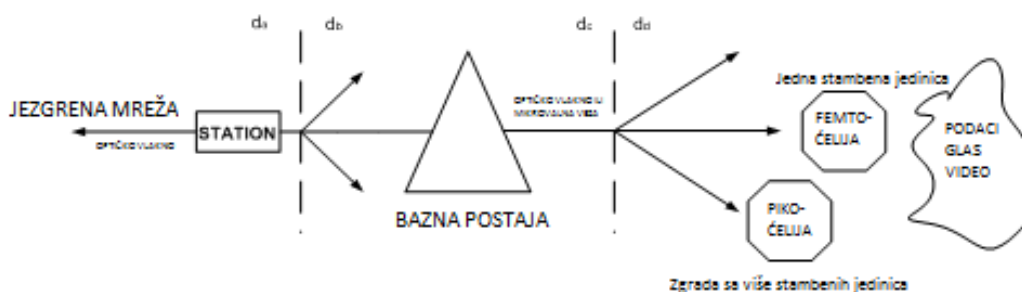
Općenito CAPEX troškovi su prikazani s troškovima opreme bazne postaje ( $C_{cell}$ ), unesenih troškova izgradnje ( $C_{insertion}$ ), troškova izgradnja *backhaul* mreže ( $C_{BHi}$ ) te sa troškovima zakupljenog spektra po baznoj postaji ( $C_{spec}$ ):

$$CAPEX = C_{cell} + C_{insertion} + C_{BHi} + C_{spec} \quad (47)$$

Troškovi ćelija ovise o broju baznih postaja. Broj baznih postaja je značajno veći nego broj centrala u fiksnoj pristupnoj mreži, te također zahtjeva optičku vezu između centrale i pojedine bazne postaje [6]. Za mobilnu mrežu, od čvora do korisničke opreme, ukupni troškovi instalacije po pristupnoj površini ( $CA_{dp}$ ) su dani sa:

$$\begin{aligned}
CA_{dp}^i = & c_{ODF} + c_{cab-e} + (c_{OLT} + c_{switch})Int \left[ \frac{n_{area}^i}{640} + 1 \right] \\
& + d_{total}^i (c_{inst} + c_{fibre} + c_{sduct} fr_{sduct}) \\
& + d_a^i c_{duct-ad}^i (1 - fr_{ab}^i) n_{divAB}^i + c_{div}^i n_{divAB}^i \\
& + d_b^i c_{duct-ad}^i (1 - fr_{ab}^i) n_{bs}^i + (c_{bs-d} + 2c_{bs} \\
& + 12c_{tr} + 2c_{pow}) n_{bs}^i + \frac{c_{spect} bw}{n_{area-total}}
\end{aligned} \tag{48}$$

gdje  $c_{ODF}$  predstavlja troškove ugradnje ODF-a,  $c_{cab-e}$  troškove ugradnje kabineta,  $c_{OLT}$  troškove instaliranja OLT pločica,  $c_{switch}$  troškove agregacijskog preklopnika,  $c_{inst}$  troškove uvlačenja kabela,  $c_{fibre}$  troškove optičkog kabela,  $c_{sduct}$  troškove uvlačenja cijevi manjeg promjera,  $c_{div}$  troškove čvorova,  $c_{duct-ad}$  troškove polaganja cijevi na A-D segmentu gdje faktor  $fr$  predstavlja udio ponovnog korištenja cijevi (po uvjetom da su korisničke lokacije prije bile povezane sa telekomunikacijskim cijevima za standardne POTS usluge, što često i može biti slučaj),  $n_{area}$  predstavlja broj korisnika po pristupnoj površini,  $n_{divAB}$  je broj čvorova dijeljenja na dijelu A-B po pristupnoj površini,  $n_{bs}$  broj baznih postaja na danoj površini,  $c_{bs-d}$  predstavlja troškove izgradnje bazne postaje,  $c_{tr}$  i  $c_{pow}$  predstavljaju troškove predajničke i prijamničke opreme, te troškove opreme napajanja, dok  $c_{spect}$  označava troškove spektralnog pojasa (800 MHz ili 2.6 GHz) [6, 21]. Skica hibridne pristupne mreže sa LTE mobilnom mrežom u bežičnom segmentu na temelju koje je i definiran izraz (48) je prikazana na slici 13.



Slika 13. Hibridna pristupna mreža sa LTE bežičnim segmentom

Ukupna duljina  $d_{total}$  se odnosi na ukupnu duljinu optičkog kabela korištenu od ekvivalentne pristupne površine do bazne postaje, te je dana sa [6]:

$$d_{total}^i = d_a^i n_{divAB}^i + d_b^i n_{bs}^i \tag{49}$$

## 5.2.2 Bežične lokalne pristupne mreže

*Ad-hoc mreže* (eng. *Wireless Meshed Networks – WMN*) se mogu graditi na temelju postojećih standarda bežičnih tehnologija, kao što je često korišteni IEEE 802.11 (WiFi) standard. Slično WiFi-ju, WMN mreže su također ograničene sa površinom pokrivanja. U slučaju WLAN isprepletenih mreža  $N$  čvorovi (eng. *Mesh portal points – MPP*), isprepleteni čvorovi (eng. *Mesh points – MP*) i korisničke postaje (eng. *Stations – STAs*) su jednoliko raspodijeljene. Za osiguravanje jednokanalne WMN mreže bez grešaka udaljenost između para čvorova treba biti manja nego maksimalni dosezi njihovih radio prijenosa. Na taj način su zadovoljena ograničenja funkcije koordinacije razdiobe (eng. *Distribution Coordination Function – DCF*) te ograničenja modova pojačanog pristupa razdijeljenim kanalima (eng. *Enhanced Distributed Channel Access – EDCA*) [5]. Stoga, maksimalna udaljenost između dva spojena korisnika je manja od 2,7km za IEEE 802.11n standard, te je istovremeni prijenos podataka na dva različita rubna uređaja moguć jedino ako su dati čvorovi dovoljno daleko jedan od drugog [5]. Trošak bežične mreže se većinom sastoji od dva dijela – infrastrukture i spektra, gdje se ukupni troškovi spektra mogu sumirati prema (50) [22]:

$$C_{tot} = C_{infra} + C_{spectrum} = NC_r + WC_w \quad (50)$$

gdje  $N$  i  $C_r$  predstavljaju broj korištenih pristupnih točaka (AP-ova) i normalizirani trošak po AP-u (€/AP),  $W$  predstavlja dodijeljeni spektar (MHz),  $C_w$  trošak po jedinici spektra (€/MHz),  $C_r$  uključuje sve CAPEX i OPEX aspekte. CAPEX najčešće predstavlja sve investicije vezane za ugradnju (npr. AP-ovi ili oprema jezgrene opreme, instalacija/izgradnja na lokaciji te antenski sustavi), dok OPEX troškovi pokrivaju troškove tijekom funkcioniranja mreže (npr. *backhaul* prijenos, najam prostora, rad i održavanje, te potrošnja energije) [22].

Osim poviše navedenih troškova izgradnje mreže, u dostupnoj literaturi se dodatni troškovi mogu pronaći i u slučaju potrebe za koordinacijom i suradnjom između pružatelja usluga na dijeljenom spektru [22]. Općenito, ovakve troškove je teško procijeniti, te oni nisu predmetom istraživanja ovog rada. Skica hibridne mreže koja koristi WLAN mrežu u bežičnom segmentu je prikazana na slici 14.

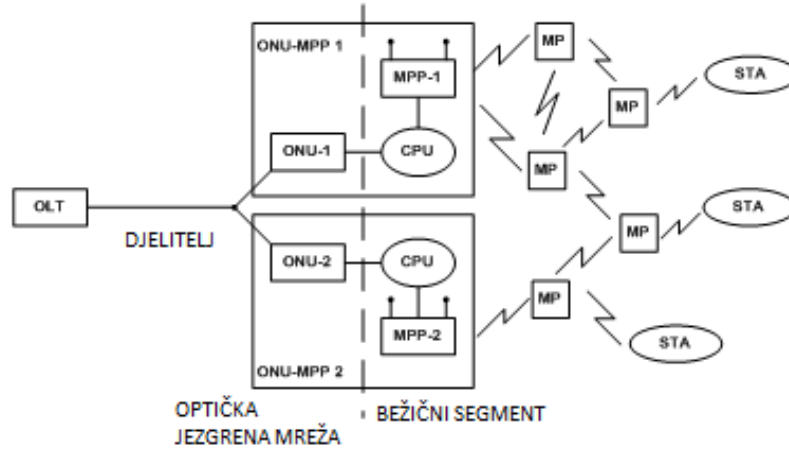
Ukupni troškovi WLAN segmenta hibridne mreže su dakle zbroj ONU i MPP troškova ( $C_{ONU}$  i  $C_{MPP}$ ) pomnoženi sa količinom  $n_{ONU/MPP}$ , MP troškova, te troškova korištenja spektra:

$$C_{WLAN} = n_{ONU/MPP}(C_{ONU} + C_{MPP}) + n_{MP} * C_{MP} + C_{spectrum} \quad (51)$$

Na temelju ovog izraza moguće je odrediti ukupne troškove hibridne optičko/bežične mreže kao zbroja ukupnih troškova optičkog i bežičnog segmenta:

$$C_{total(WLAN)} = C_{c(optic)} + C_{WLAN} \quad (52)$$

$$C_{total(WLAN)} = d_{total}^i C_{fibre} + C_{COI} + C_M + L_D(C_D + C_T) + C_{CO} + C_S + n_{ONU/MPP}(C_{ONU} + C_{MPP}) + n_{MP}C_{MP} + C_{spectrum} \quad (53)$$



Slika 14. Hibridna pristupna mreža sa WLAN bežičnim segmentom

### 5.2.3 WiFi mreže

Iako same WiFi mreže nisu u fokusu ovog rada, u literaturi je moguće pronaći procjene troškova hibridne optičko/bežične mreže koja podrazumijeva korištenje WiFi mreže u bežičnom segmentu [25]. Što se tiče optičkog segmenta procjena troška se može svesti na:

$$C_{(optic)} = OLT + nxONUs + OLT-to-ONU fiber + ONU-to-customer-Fiber \quad (54)$$

Ukupni troškovi hibridne mreže koja podrazumijeva WiFi bežični segment se može prikazati kao:

$$C_{(WiFi)} = OLT + nxONUs + WiFi routers + OLT-to-ONU fiber \quad (55)$$

Ukoliko se napravi procjena da je cijena WiFi usmjernika jednaka polovici cijene jednog ONU uređaja izraz se može pojednostavniti:

$$C_{(WiFi)} = OLT + nx0.5xONUs + OLT-to-ONU fiber \quad (56)$$

Naravno troškovi se povećavaju ukoliko je ukupni kapacitet ONU uređaja veći, npr. 10 Gb/s [25].



### 5.3 Kapitalni i operativni troškovi bakrene xDSL pristupne mreže

Standardna xDSL bakrena pristupna mreža koja osigurava širokopojasne usluge se sastoji od tri segmenta:

- 1) Jezgrene mreže koja prespaja centralne jedinice, te ih povezuje s internetom. Najčešće je bazirana na optičkim kabelima u cijevima, te ju je moguće iskoristiti za razna skraćena petlji.
- 2) Centrale ili udaljeni čvorovi (npr. u obliku kabineta), gdje se nalazi sva potrebna oprema, kao npr. razdjelnici (eng. *Main Distribution Frame – MDF*), DSLAM i PSTN preklopnici. Sav lokalni promet je multipleksiran ovdje, te je spojen na ostatak mreže pružatelja usluga.
- 3) Pristupna mreža obuhvaća bakrene kabele uvučene u cijevima ili zračne kabele sve do korisničke lokacije.

Doseg ADSL signala je u pravilu 4km od centrale/udaljenog čvora.

Područja gdje bakrena infrastruktura već postoji te ju je moguće iskoristiti za dogradnju/izgradnju mreže se zovu *brownfield* područja. Glavni problem koji se tiče izoliranih i ruralnih krajeva je mogućnost pružanja širokopojasnih usluga. Često su ova područja pokrivena osnovnom POTS (eng. *Plain Old Telephone Service*) uslugom, međutim optička mreža i DSLAM uređaji su rijetko instalirani, jer se u trenutku projektiranja smatralo da bi takvi projekti rezultirali lošim povratom investicije. Za dogradnju postojeće mreže važno je povezati agregacijske uređaje u centralama sa kabinetima u ruralnim krajevima preko optičke mreže, te iskoristiti postojeće bakrene kablove za povezivanje pojedinih korisnika na navedeni kabinet. CAPEX ukupni troškovi za osiguravanje širokopojasnih usluga u ruralnim krajevima gdje bakrena infrastruktura već postoji, međutim podržava samo glasovne usluge, je bazirana na FTTC/VDSL konceptu te se mogu prikazati kao [6]:

$$\begin{aligned}
 CA_{dp}^i = & c_{ODF} + c_{cab-e} + (c_{OLT} + c_{switch})Int \left[ \frac{n_{area}^i}{640} + 1 \right] \\
 & + d_{total}^i (c_{inst} + c_{fibre} + c_{sduct} fr_{sduct}) \\
 & + d_a^i c_{duct-ad}^i (1 - fr_{ab}^i) n_{divAB}^i + c_{div}^i n_{divAB}^i \\
 & + d_b^i c_{duct-ad}^i (1 - fr_{ab}^i) n_{cab}^i + (c_{cab} + c_{split}) n_{cab}^i \\
 & + d_c^i c_{duct-ad}^i (1 - fr_{cd}^i) n_{cab}^i + c_{div}^i n_{divCD}^i \\
 & + d_d^i c_{duct-ad}^i (1 - fr_{cd}^i) n_{box}^i \\
 & + (c_{box} + c_{VDSL} + c_{batt}) n_{box}^i + c_{mig} n_{area}^i
 \end{aligned} \tag{57}$$

gdje  $c_{ODF}$  predstavlja troškove izgradnje ODF okvira,  $c_{cab-e}$  troškove kabineta,  $c_{OLT}$  troškove instaliranja OLT pločica,  $c_{switch}$  troškove ugradnje agregacijskog preklopnika,  $c_{inst}$  troškove kableske instalacije,  $c_{fiber}$  troškove optičkih vlakana,  $c_{sduct}$  troškove polaganja cijevi manjeg promjera,  $c_{div}$  troškove čvorova,  $c_{duct-ad}$  izgradnja cijevi u A-D segmentu,  $fr$  faktor predstavlja udio ponovnog korištenja cijevi,  $n_{area}$  predstavlja broj korisnika po pristupnoj površini,  $n_{divAB}$

je broj čvorova dijeljenja na A-B segmentu po pristupnom području,  $n_{cab}$  broj kabineta na danom području,  $n_{box}$  je broj distribucijskih kutija,  $c_{box}$  troškove distribucijskih kutija,  $c_{split}$  predstavlja troškove GPON djelitelja,  $c_{VDSL}$  troškove mini-VDSLAM (unutar kabineta),  $c_{batt}$  predstavlja troškove VDSLAM baterija, dok  $c_{mig}$  označava troškove migracije postojećih bakrenih linija [6, 21].

Ukupna duljina kabela ( $d_{total}$ ) se odnosi na ukupnu duljinu vlakana od lokalne centrale do korisničke lokacije te je dana sa (58) [6]:

$$d_{total}^i = d_a^i n_{divAB}^i + (d_b^i + d_c^i) n_{cab}^i + d_d^i n_{box}^i \quad (58)$$

OPEX troškovi za FTTC/VDSL mreže ovise o potrošnji energije, te su značajno veća u usporedbi s drugim arhitekturama [6]. Glavni razlog za ovakav zaključak proizlazi iz činjenice da FTTC arhitektura koristi kabinete koje troše dosta električne energije. Čak je povećana i potrošnja energije na korisničkoj opremi.

#### 5.4 Usporedba FTTC/VDSL pristupa s hibridnom optičko-bežičnom arhitekturom

Kako je ranije spomenuto, FTTC/VDSL koncept predstavlja standard za pružanje širokopojsnih usluga žičanim putem u ruralnim sredinama s malim brojem stanovnika po  $\text{km}^2$ . Također su predstavljeni i procijenjeni CAPEX troškovi za hibridni pristup (koji se opet mogu podijeliti u odnosu na tehnologiju u bežičnom segmentu na one koje koriste LTE i WLAN pristup) te za FTTC/VDSL pristup.

##### 5.4.1 Hibridne mreže s LTE mrežom u bežičnom segmentu

Ukupni troškovi hibridne optičko/bežične mreže kada je mobilna mreža korištena u bežičnom segmentu su definirani kao suma troškova optičke pristupne mreže (od centrale do ONU uređaja) i troškova mobilne mreže povezanih na ONU uređaje, a na temelju izraza (37) i (48):

$$C_{Hybrid(LTE)} = C_{C(optic)} + CA_{dp(LTE)}^i \quad (59)$$

$$C_{Hybrid(LTE)} = C_{COI} + C_M (1 + N_{SS}) + L_D (C_D + C_T) + C_{ch} + C_{LC} + C_S + n_{ONU} C_{ONU} + C_{ODF} + C_{cab-e} + d_{total}^i (C_{inst} + C_{fibre} + C_{sduct} f_{r_{sduct}}) + (C_{OLT} + C_{switch}) * Int [(n_{area}^i / 640) + 1] + C_{div}^i n_{divAB}^i + d_a^i C_{duct-ad}^i (1 - f_{r_{ab}^i}) n_{divAB}^i + d_b^i C_{duct-ad}^i * (1 - f_{r_{ab}^i}) n_{bs}^i + (C_{bs-d} + 2C_{bs} + 12C_{tr} + 2C_{pow}) * n_{bs}^i + (C_{spectbw} / n_{area-total}) \quad (60)$$

Da bi se odredilo pri kojoj točki se trošak za FTTC/VDSL mreže i hibridne arhitekture izjednačava, te koji su sve parametri odlučujući za odabir troškovno efikasne arhitekture, potrebno je izraze za procjene troškova obaju pristupa (FTTC i hibridnog) izjednačiti, te prikazati matematičkom formulacijom:

$$C_{Hybrid(LTE)} = C_{FTTC/VDSL} \quad (61)$$

Za parametar koji bi prikazao troškovnu izjednačenost ovih dvaju arhitekture je duljina kabela. U literaturi je pronađen model po kojem se pojedina područja dijele na različite geotipove, a na temelju broja stanovnika po km<sup>2</sup> [21]. Predstavljen je španjolski model, koji se može primijeniti i na hrvatsko područje zbog sličnosti terena i broja stanovnika u određenim područjima (oba područja pripadaju tipičnom mediteranskom okolišu). Na taj način su sva naselja sa 5-10 stanovnika / km<sup>2</sup> ili manje grupirana u IX/X grupu. Ovaj podatak je posebno interesantan za određivanje parametra  $fr$  koji se odnosi na udio iskorištavanja postojećih cijevi, te se mogu primijeniti slijedeće procjene:

$$fr_{ab}^i = 40\% = 0.4 \quad (62)$$

$$fr_{cd}^i = 20\% = 0.2 \quad (63)$$

Ovaj udio je značajno manji za ruralna područja, jer u takvim geotipovima je postojeća infrastruktura najčešće slabo razvijena. Također se može primijeniti i još jedna pretpostavka u kojoj čvorovi dijeljenja i kabineti nisu potrebni, jer se pretpostavlja direktna veza do centrale u *point-to-point* konfiguraciji. U takvom primjeru nema praktične potrebe za više od jednog kabineta i čvora dijeljenja za tako malen broj korisnika. Također moguće je prihvatiti toleranciju od 20% za duljinu uvučenog optičkog kabela u odnosu na duljinu planiranih cijevi, jer su nužne kableske rezerve (najčešće smještene u zdencima), te, također, i zato što manji dijelovi optičkih kabela nisu smješteni unutar cijevi. Stoga je moguće dalje pojednostavniti izraz sa slijedećim pretpostavkama:

$$n_{cab}^i = 1 \quad (64)$$

$$n_{divCD}^i = 1 \quad (65)$$

$$d_{total}^i = 1.2 L_D \quad (66)$$

U bežičnom dijelu izraza vrijednost  $d_a$  je ograničena na 0, jer u hibridnim arhitekturama mobilni centri preklapanja (eng. *Mobile switching centers – MSC*) su povezani na njima pripadajući ONU uređaj. Nakon svih ovih pretpostavki glavna jednadžba se može prikazati kao:

$$d_{total(LTE)}^i = 1.2*[C_{cab} + C_{div}^i + (C_{box} + C_{VDSL} + C_{batt})n_{box}^i - (C_{spectbw}/n_{area-total}) - (C_{bs-d} + 2C_{bs} + 12C_{tr} + 2C_{pow}) * n_{bs}^i - (C_{COI} + C_M(I+N_{SS}) + C_{ch} + C_{LC} + n_{ONU} * C_{ONU}) + C_{duct-ad}^i(0.6d_b^i(1-n_{bs}^i) + 0.8(d_c^i + d_d^i n_{box}^i)) + C_{mig} n_{area}^i] / (C_D + C_T) \quad (67)$$

Ovaj izraz pokazuje da kada je duljina između postojeće centrale te lokacije planiranog kabineta u ruralnim područjima jednaka desnoj strani izraza, tada ne postoje značajne tehnološke prednosti korištenja hibridne arhitekture nad FTTC/VDSL pristupom i obratno. Važno je pri tom spomenuti da u navedenom izrazu položaj planiranog kabineta za FTTC/VDSL pristup se poklapa sa planiranim položajem ONU uređaja u hibridnom pristupu, na koji je povezan MSC uređaj.

#### 5.4.2 Hibridne mreže s WLAN mrežom u bežičnom segmentu

Slično kao i za slučaj sa LTE mrežama u bežičnom segmentu i za slučaj određivanja troškovne efikasnosti kada su WLAN mreže korištene u bežičnom segmentu hibridne optičko/bežične mreže u odnosu na FTTC/VDSL pristup koristi se izraz:

$$C_{FTTC/VDSL} = C_{Hybrid(WLAN)} \quad (68)$$

Na temelju izraza ukupnih troškova ovih dvaju pristupa (57) za  $C_{FTTC/VDSL}$  i (53) za  $C_{Hybrid(WLAN)}$  moguće je dalje razviti formulaciju koristeći aproksimacije (62), (63), (64), (65) i (66), koje smo već spomenuli u prošlom odjeljku, te, također uzmemo da je:

$$d_a^i = 0 \quad (69)$$

Stoga konačni izraz je:

$$d_{total(WLAN)}^i = [2C_{cab} + (C_{OLT} + C_{switch})Int[n_{area}^i/640 + 1] + c_{duct-ad}^i(0.6d_b^i + 0.8d_c^i + 0.8d_d^i n_{box}^i) + (C_{box} + C_{VDSL} + C_{batt})n_{box}^i + C_{mig} n_{area}^i + C_{div}^i(I + n_{divAB}^i) - (C_{CoI} + C_M(I+N_{SS}) + C_{ch} + C_{LC} + n_{ONU}(C_{ONU} + C_{MPP}) + n_{MP}C_{MP} + C_{spectrum})] / [(C_D + C_T)/1.2 - (C_{ins} + C_{sduci}r_{sduct})] \quad (70)$$

Slično kao i u prošlom odjeljku može se doći do sličnih zaključaka. Ukoliko je stvarna duljina optičkog kabela od centrale do ONU uređaja definirana kao u izrazu iznad tada FTTC/VDSL pristup nema nikakve tehnološke prednosti u odnosu na hibridnu optičko/bežičnu mrežu i obratno.

Moguće je također pretpostaviti dodatne aproksimacije koje se tiču cijene korištene opreme. U tablici 3 su dane relacije između cijena opreme [6. 20]. Većina cijena nisu dane u apsolutnoj vrijednosti zato što se iste mogu razlikovati u ovisnosti o promatranom tržištu, te se također cijene mogu s vremenom i mijenjati. Pretpostavka je da će odnosi među cijenama

pojedinih komada opreme ostati nepromijenjeni tijekom vremena. Kao referentna veličina uzeta je cijena kabineta ( $C_{cab}$ ), jer se pretpostavlja da je za jednu pokrivenu površinu u ruralnom naselju jedan kabinet dovoljan. Na temelju podataka iz tablice 4 moguće je i još pojednostavniti poviše definirane izraze (67) i (70):

$$d_{div}^{i total(LTE)} = 1.2 / (C_D + C_T) * [C_{cab} (1 + 0,237n_{box}^i + 6,258n_{bs}^i - 0,005n_{ONU}) + C_{duct-ad}^i * (0,6d_b^i(1 - n_{bs}^i) + 0,8(d_c^i + n_{box}^i d_d^i)) + C_{mig}^i n_{area}^i - (C_{Col} + C_M(I + N_{SS}) + C_{ch} + C_{LC})] \quad (71)$$

$$d_{div}^{i total(WLAN)} = [C_{cab}(2 + 1.43Int[n_{area}^i/640 + 1]) + 0.237n_{box}^i - 0.07n_{ONU/MPP} - 0.065n_{MPP}) + c_{duct-ad}^i(0.6d_b^i + 0.8(d_c^i + d_d^i n_{box}^i)) + C_{mig}^i n_{area}^i + c_{div}^i(1 + n_{divAB}^i) - (C_{Col} + C_M(I + N_{SS}) + C_{ch} + C_{LC} + C_{spectrum})] / [(C_D + C_T)/1.2 - (C_{ins} + C_{sduct} fr_{sduct})] \quad (72)$$

Tablica 4. Odnosi cijena kabineta i ostale opreme

Kratica	Cijena	Komentar
$C_{box}$	0,108 $C_{cab}$	Distribucijske kutije
$C_{VDSL}$	0,086 $C_{cab}$	mini-DSLAM (FTTC/VDSL)
$C_{batt}$	0,043 $C_{cab}$	Baterija po kabinetu
$C_{bs-d}$	1,3 $C_{cab}$	Ugradnja bazne postaje
$C_{bs}$	1 $C_{cab}$	Trošak bazne postaje
$C_{tr}$	0,174 $C_{cab}$	Cijena primopredajnika
$C_{pow}$	0,435 $C_{cab}$	Oprema napajanja
$C_{ONU}$	0,005 $C_{cab}$	ONU cijena
$C_{cab-e}$	0,156 $C_{cab}$	Kabinet (ODF, djelitelj, ONU i xDSL oprema)
$C_{OLT}$	1,3 $C_{cab}$	OLT trošak
$C_{switch}$	0,13 $C_{cab}$	Agregacijski preklopnik (do 640 korisnika)
$C_{MP}$	0,065 $C_{cab}$	Troškovi za Wireless Mesh Point
$C_D + C_T$	70 € / m	Troškovi rada i materijal
$C_{div}^i$	600 €/komad	Odvajanje vlakana/kabela na a-b i c-d segmentima
$C_{spectbw}$	87 $C_{cab}$	Troškovi najma spektralnog pojasa za cijenu pri 2,6GHz
$C_{MPP}$	0.065 $C_{cab}$	Troškovi Mesh portal points

Parametri koji su preostali u navedenim izrazima nisu stavljeni u odnos sa cijenom kabineta, jer njihova vrijednost ovisi o duljini petlje, te je prethodno potrebno poznavati udaljenost od najbliže centrale do željene lokacije za kabinet.

### 5.4.3 Pojednostavljanje izraza temeljeno na stvarnom scenariju

S ciljem daljnjeg pojednostavljanja prije spomenutih izraza dan je primjer scenarija koji je tipičan za mediteransko podneblje (npr. Hrvatska), te se temelji na analizi slučaja u kojoj je naselje sa 400 potencijalnih korisnika na 5km udaljenosti od najbliže centrale gdje se nalazi

agregacijska oprema, te po postojećoj infrastrukturi nije moguće pružati širokopojasne usluge, već se preko postojećih bakrenih kabela omogućuju samo glasovne usluge. Kao rješenje predlaže se hibridna optičko/bežična pristupna mreža. Pitanje koje se sada nameće je koju arhitekturu koristiti: onu sa LTE rješenjem u bežičnom segmentu ili onu sa WLAN rješenjem? Da bi se došlo do odgovora na navedeno pitanje potrebno je prvo definirati pojedine pretpostavke. Troškovi kopanja i polaganja cijevi  $C_D$  i  $C_T$  podrazumijevaju troškove rada i materijala (pretpostavka je da je profil površine 100% asfaltirana cesta), koji ovise o duljini od centrale do položaja planiranog kabineta (u scenariju je to 5km). Broj sekundarnih djelatnika ( $N_{SS}$ , eng. *secondary splitters*) sa omjerom dijeljenja 1:64 ovisi o broju kućanstava (400 u primjeru).  $C_{div}$  se odnosi na odvajanjima trase na a-b i c-d segmentima, te uključuje svjetlovodne kutije i spajanje vlakana.  $C_{duct-ad}^i$  u slučaju navedenog scenarija se definira kao  $C_D + C_T$ . Migracija postojećih bakrenih linija ( $C_{mig}$ ) je ovisna o broju postojećih korisnika. Na temelju literature pretpostavljeno je da za ruralna područja segment  $d_b$  pokriva 21% ukupne duljine,  $d_c$  57%, a  $d_d$  cca 8% ukupne planirane duljine [21]. Za potrebe ovog scenarija uzima se korištenje jednog ONU uređaja, jedne distribucijske kutije, te jedne bazne postaje. Troškovi najma spektra predviđeni su za frekvenciju od 2,6 GHz. Prosječno se planira izrada telekomunikacijskih zdenaca na međusobnim razmacima od 50 m, te je s obzirom na ulazni podatak o udaljenosti od centrale potrebno planirati otprilike 100 zdenaca. Ukupni troškovi zdenaca  $C_M$  obuhvaćaju materijal i rad. Troškovi šasije te linijske pločice su pretpostavljeni za jednu šasiju, za jedan OLT uređaj sa linijskom pločicom sa do maksimalno 8 portova. Broj čvorova dijeljenja A-B ( $n_{divAB}$ ) je 4 [20]. Prema propisanoj regulativi u Republici Hrvatskoj za cijelu duljinu nove infrastrukture u koju bi se uvlačio/upuhivao svjetlovodni kabel potrebno je u dolazne cijevi prethodno uvući cijevi manjeg promjera ( $C_{sduct}$ ). S druge pak strane cijevi manjeg promjera nisu nužne za pristupnu mrežu. Sve ove pretpostavke su sumarno prikazane u tablici 5.

Tablica 5. Dodatne aproksimacije

Br.	Parameter	Pretpostavka
1	$C_D + C_T = C_{duct-ad}^i$	$15,21C_{cab}$
2	$C_{div}$	$0,521C_{cab}$
3	$d_b = 0,21Length^*$	1050m
4	$d_c = 0,57Length^*$	2850m
5	$d_d = 0,08Length^*$	400m
6	$n_{box}^i = n_{bs}^i = n_{ONU} = n_{ONU/MPP} = n_{MP}$	1
7	$C_{spectbw}/n_{area-total}$	$0,217C_{cab}$
8	$C_{mig}n_{area}^i$	$0,348C_{cab}$
9	$C_{M(total)} = 50 * C_M$	$0,76C_{cab}$
10	$C_{ch}$	$0,13C_{cab}$
11	$C_{LC}$	$0,348C_{cab}$
12	$n_{divAB}$	4
13	$f_{r_{sduct}}$	95%
14	$C_{sduct}f_{r_{sduc}}$	$0,31C_{cab}$
15	$C_{ins}$	$2,173C_{cab}$
16	$N_{SS} = HH/N_{split-ratio} = 400/64$	6.25

\*postoci tipični za geotip IX/X [6]

Na temelju pretpostavki iz tablica 4 i 5 ukupna duljina kabela  $d_{total(LTE)}^i$  za hibridnu mrežu koja koristi LTE tehnologiju u bežičnom segmentu je:

$$d_{total(LTE)}^i = 1.2 * [39548,4C_{cab} - C_{CoI}] / 15.21C_{cab} \quad (73)$$

Slično, na temelju pretpostavki iz tablica 4 i 5 ukupna duljina kabela  $d_{total(WLAN)}^i$  za hibridnu mrežu koja koristi WLAN tehnologiju u bežičnom segmentu je:

$$d_{total(WLAN)}^i = [49130,2C_{cab} - (C_{CoI} + C_{spectrum})] / [12.365C_{cab} - C_{ins}] \quad (74)$$

## ZAKLJUČAK

Arhitekture temeljene na hibridnim optičko-bežičnim mrežama predstavljaju obećavajuće rješenje za omogućavanje širokopojsnih usluga korisnicima u izoliranim, ruralnim i slabo naseljenim područjima. Arhitektura se u osnovi sastoji od dva temeljna segmenta: optičkog i bežičnog. Optički segment obuhvaća povezivanje postojeće centrale (gdje se nalazi agregacijska oprema) sa promatranom lokacijom, te na njega otpada i najveći dio troškova, kada su u pitanju troškovi rada i materijala. Optički segment je temeljen na EPON/GPON standardu u kojem se mogu postići brzine od 1Gb/s do 10 Gb/s, koliko standard predviđa za pristupne mreže nove generacije. Kada se govori o bežičnom segmentu tada je izbor veći. Pokazalo se da posebnu ekonomsku isplativost imaju hibridne mreže temeljene na WiMAX tehnologiji u bežičnom segmentu. Kako WiMAX nema širu primjenu u Republici Hrvatskoj, uvid i daljnja rasprava za takvu arhitekturu nisu dani u ovom radu. Međutim, u bežičnom segmentu postoji još mogućnosti, te su posebno dani uvidi u LTE bežične mreže 4. generacije, WLAN mreže te WiFi mreže. Iako su hibridne mreže još uvijek predmetom analiziranja i proučavanja, inovativni prijedlozi koji bi omogućili razvoj arhitekture za specijalne namjene (npr. za korisnike koji se voze u vlaku) već postoje, te se poseban naglasak stavlja na ekonomičnost i isplativost realizacije same takve arhitekture.

U radu su prezentirane metode optimiziranja bežičnih i optičkih segmenata, te su pri tom te metode prezentirane neovisno jedna od druge. Optimiziranje je predstavljeno pomoću matematičkih izraza koji bi prilikom planiranja mreže osigurali smanjenje elemenata (uređaja i opreme) mreže, smanjenje ukupnih investicijskih i operativnih troškova, kao i smanjenje vremena prijenosa, pri tom zadržavajući zadovoljavajuću kvalitetu usluge. Posebno je dan uvid u optimiziranje heterogene bežične mreže u optičkom segmentu hibridne arhitekture. Heterogena bežična mreža se sastoji od makro baznih stanica te piko i femto stanica. Upravo heterogene mreže bi mogle predstavljati najisplativiju soluciju hibridne mreže koja bi omogućavala povezivanje više obližnjih naselja.

Tehno-ekonomskom analizom koja odvojeno obuhvaća optički i bežični segment hibridne mreže moguće je dobiti, kao njihovu rezultantu, ukupne procijenjene troškove hibridne optičko-bežične mreže. Planiranu duljinu optičkog kabela hibridne arhitekture moguće je uzeti kao parametar preko kojeg bi se mogla ispitati ekonomska isplativost same arhitekture. Naime, ta duljina se uspoređuje s planiranom duljinom optičkog kabela kod FTTC/VDSL arhitekture, koja predstavlja standardan način dovođenja širokopojsnih usluga žičanim putem do određenih lokacija. U usporedbi koja je obuhvaćena ovim radom definirana je kritična duljina optičkog kabela od najbliže centrale (s agregacijskom opremom) do željene lokacije za koju su ukupni troškovi hibridne mreže jednaki procijenjenim troškovima FTTC/VDSL mreže i to posebno za hibridne mreže temeljene na LTE mrežama (izraz (67)) i WLAN mrežama u bežičnom dijelu (izraz (70)). Uz pomoć pojedinih aproksimacija na temelju zadanog scenarija iz realnog života moguće je navedene izraze i dalje pojednostavniti.



## SAŽETAK

U ovom radu su predstavljene osnove na kojima počiva hibridna optičko-bežična mreža. Također, navedene su prednosti i izazovi hibridne arhitekture. Dan je uvid u osnovne segmente arhitekture, tj. u optički i bežični segment, te je, također, obrazloženo koje se sve tehnologije mogu u pojedinom segmentu koristiti. Iako je hibridna optičko-bežična arhitektura još uvijek u fazi ispitivanja i proučavanja postoje dobro obrađene arhitekture od kojih su neke namijenjene za posebne namjene. Posebna pozornost je dana na tehno-ekonomskoj analizi hibridne arhitekture. Metoda kojom se provodi ta analiza podrazumijeva tehno-ekonomske analize pojedine tehnologije u pojedinom segmentu arhitekture. Smatra se da se zbrojem procjena troškova planiranog optičkog (EPON/GPON) i bežičnog segmenta (LTE, WLAN) dobivaju ukupni procijenjeni troškovi hibridne arhitekture. Preko parametra duljine optičkog kabela uspoređuju se tehno-ekonomski odnosi između hibridne i FTTC/VDSL arhitekture, koja se uzima za referentnu arhitekturu za skraćivanje petlje te omogućuje pružanje širokopojsnih usluga u ruralnim, izoliranim i rijetko naseljenim područjima.

## ABSTRACT

In this work basic concepts of hybrid optical-wireless networks are given. Also, all the advantages and challenges of the hybrid architecture are mentioned as well. The insight in founding segments of the architecture is given, namely optical and wireless segment and, also, all the technologies suitable to implement in each segment are explained. Although hybrid optical-wireless architecture is still in the study and research stage, thoroughly planned architectures are designed and, some of them are designed exclusively for special purposes. Techno-economic analyses of the hybrid architecture are presented in more detail. The method, by which these analyses are implemented, implies partial techno-economic analysis for each technology in each segment. It is considered that by adding up together the planned optical segment costs (for EPON/GPON) and the planned wireless segment costs (LTE and WLAN) it is possible to get total estimated hybrid network costs. By using a fiber cable length as the main parameter it is possible to compare techno-economic relations between hybrid and FTTC/VDSL architecture, that is taken as the referent architecture, by which it is possible to shorten the loop length and provide broadband services to rural, isolated and scarcely populated areas.

## LITERATURA

- [1] M. Maier, N. Ghazisaidi, M. Reisslein: “The Audacity of Fiber-Wireless (FiWi) Network”, Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering Volume 6, pp 16-35, 2009.
- [2] S. Sarkar, S. Dixit, B. Mukherjee: “Hybrid Wireless-Optical Broadband-Access Network (WOBAN): A Review of Relevant Challenges”, Journal of lightwave technology, vol. 25, No. 11, November 2007.
- [3] N. Ghazisaidi, M. Maier: „FiWi Access Networks“, Cambridge University Press, 2012.
- [4] A. Ng’oma: “Radio-over-Fibre Technology for Broadband Wireless Communication Systems”, Technische Universiteit Eindhoven, Doctoral thesis, ISBN 90-386-1723-2, 2005
- [5] N. Ghazisaidi, M. Scheutzow, M. Maier “Frame aggregation in fibre-wireless (FiWi) broadband access networks”, The Institution of Engineering and Technology, U.K., Electronics letters, vol. 46, no. 5, 4th March 2010
- [6] R. Coomonte Belmonte: „Contribution to energy consumption modeling and forecast in next generation access networks“, Ph. D. Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Spain, 2013
- [7] F. Aurzada, M. Levesque, M. Maier, M. Reisslein: „FiWi Access Networks Based on Next-Generation PON and Gigabit-Class WLAN Technologies: A Capacity and Delay Analysis”, IEEE/ACM Transactions on Volume: PP , Issue: 99, 2013
- [8] Ll. Gutierrez, P. Garfias, M. De Andrade, C. Cervello-Pastor and S. Sallent (2010): “Next Generation Optical Access Networks: from TDM to WDM, Trends in Telecommunications Technologies”, Christos J Bouras (Ed.), ISBN: 978-953-307-072-8, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/trends-intelecommunications-technologies/next-generation-optical-access-networks-from-tdm-to-wdm>
- [9] D. Bauer, F. Geilhardt, R. Hulsermann, M. Kind, C. Lange, T. Monath, E. Weis: “Opportunities for Next-Generation Optical Access”, Deutsche Telecom Laboratories, 2011.
- [10] J. Zhang, N. Ansari: „Toward Energy-Efficient 1G-EPON and 10G-EPON with Sleep-Aware MAC Control and Scheduling“, New Jersey Institute of Technology, 2011
- [11] P. Chanclou, F. Bourgart, B. Landousies, S. Gosselin, B. Charbonnier, N. Genay, A. Pizzinat, F. Saliou, B. LeGuyader, B. Capelle, Q. T. Le, F. Raharimanitra, A. Gharba, L. Anet Neto, J. Guillory, Q. Deniel, S. Deniel: “Technical options for NGPON2 beyond 10G PON”, Conference Paper, European Conference and Exposition on Optical Communications Geneva, Switzerland, September 18-22, 2011
- [12] W. Lim, Y.M. Yang, P. Kourtessis, M. Milosavljevic, J. M. Senior: „TWDM Bandwidth Allocation based on the NG-PON2 Standard”, Journal of Lightwave Technology, 2013
- [13] Z. Li, L. Yi: “Key technologies and system proposals of TWDM-PON”, Higher Education Press and Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012
- [14] L. G. Kazovsky, N. Cheng, W. T. Shaw, D. Gutierrez, S.W. Wong: „Broadband optical access networks“, John Wiley & Sons, Inc, 2011

- [15] Hoon Kim: “Radio-over-Fiber Technology for Wireless Communication Services”, Samsung Electronics, paper 2005
- [16] Z. Jia, J. Yu, G. Ellinas, and G.-K. Chang: “Key Enabling Technologies for Optical-Wireless Networks: Optical Millimetre-Wave Generation, Wavelength Reuse, and Architecture”, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 25, no. 11, pp. 3452–3471, Nov. 2007.
- [17] D. Novak, “Fiber Optics in Wireless Applications”, OFC 2004 Short Course 217, 2004.
- [18] N. Ghazisaidi, M. Maier: „Techno-economic analysis of EPON and WiMAX for future Fiber-Wireless (FiWi) networks“, Computer Networks 54; 2640–2650, www.elsevier.com/locate/comnet, 2010.
- [19] D. J. Kadhim, N. A. Hussain: “Link and cost optimization of FTTH network implementation through GPON”, Communications and network, 438-433, May 2013
- [20] S. Ziaie: „Techno-Economic Analysis of Optical Access Networks“, Ph. D. Thesis, Dissertation, Universidade de Aveiro, Portugal, 2013
- [21] C. Feijóo, J. L. Gomez-Barroso, S. Ramos: „An Analysis of Next Generation Access Networks Deployment in Rural Areas“, FITCE Congress (FITCE) Palermo, Italy, p. 1 - 18, 2011
- [22] D. H. Kang, K. W. Sung, J. Zander: “High Capacity Indoor and Hotspot Wireless Systems in Shared Spectrum: A Techno-Economic Analysis”, IEEE Communications Magazine, December 2013
- [23] P. N. Tantubay, S. D. Patil, S. V. Kulkarni: „A Review on Cost-Efficient and Optimum Solution for Fiber-Wireless (Fi-Wi) Technology“, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 4, Issue 2, February 2015.
- [24] M. Maier: „Fiber-Wireless (FiWi) Broadband Access Networks in an Age of Convergence: Past, Present, and Future“, Hindawi Publishing Corporation Advances in Optics Volume 2014, Published 22 June 2014.
- [25] P. Chowdhury, S. Sarkar, and A. A. Reaz: „Comparative Cost Study of Broadband Access Technologies“, University of California, Davis, 2008
- [26] J. Li, G. Shen: „Cost Minimization Planning for Passive Optical Networks“, The Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC), San Diego (CA), USA, February 24-28, 2008.
- [27] J. Li, G. Shen: „Cost Minimization Planning for Greenfield Passive Optical Networks“, The Journal of Optical Communications and Networking (JOCN), Vol. 1, No. 1, June 2009.
- [28] P. Lafata: „Advanced Algorithm for Optimizing the Deployment Cost of Passive Optical Networks“, Advances in electrical and electronic engineering, Optics and Optoelectronics, Volume 11, Number 1, March, 2013.
- [29] B. Li, Y. Liu, L. Guo: „Load Balanced Optical-Network-Unit (ONU) Placement Algorithm in Wireless-Optical Broadband Access Networks“, International Journal of Future Computer and Communication, Vol. 2, No. 2, April 2013
- [30] I. Filippini, M. Cesana: „Topology optimization for hybrid optical/wireless access networks“, Ad-hoc Networks Journal No. 8, page 614-625, Elsevier publishing, 2010.

- [31] D. Eppstein, K.A. Wortman: „Minimum Dilation Stars“, Department of Computer Science, University of California, Irvine, March, 16th, 2005
- [32] W. Zhao, S. Wang, C. Wang, X. Wu: „Cell Planning for Heterogeneous Networks: An Approximation Algorithm“, IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), 2014
- [33] Z. Frias, J. Perez: „Techno-economic analysis of femtocell deployment in long-term evolution networks“, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012
- [34] I.S. Hwang, T.-J. Yeh, M. A. Lotfolahi, B.-J. Hwang, A. A. Nikoukar: „Synchronous Interleaved DBA for Upstream Transmission over GPON-LTE Converged Network“, Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, Hong Kong, Vol II, 2015
- [35] E. Amaldi, A. Capone, M. Cesana, I. Filippini, F. Malucelli: „Optimization Models and Methods for Planning Wireless Mesh Networks“, Preprint submitted to Elsevier January, 23rd, 2008
- [36] A. So, B. Liang: „An Efficient Algorithm for the Optimal Placement of Wireless Extension Points in Rectilinear Wireless Local Area Networks“, Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks, 9 pp. - 25, 24-24 Aug. 2005
- [37] M. Minelli, Maode Ma, M. Coupechoux, J.-M. Kelif, M. Sigelle, et al.: „Optimal Relay Placement in Cellular Networks“, IEEE Transactions on Wireless Communications, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 13 (2), pp. 998-1009, 2014
- [38] A. So, B. Liang: „A Lagrangian Approach for the Optimal Placement of Wireless Relay Nodes in Wireless Local Area Networks“, 5th International IFIP-TC6 Networking Conference, p 160-172, Coimbra, Portugal, May 15-19, 2006.