

Tehno-Ekonomska analiza implementacije optičkih fronthaul mreža u 5G sistemima

Vukašin Petrović, Prof. Dr. Mirjana Radivojević ¹

Sadržaj – Rad analizira značaj 5G tehnologije i njen doprinos razvoju internet stvari (eng. *Internet of Things*, skraćeno *IoT*), ističući ključne izazove u projektovanju *fronthaul* mreža. Obradeni su koncepti centralizovane arhitekture radio pristupne mreže (eng. *Radio access network*, skraćeno *RAN*), *TWDM-PON* (eng. *Time Wavelength Division Multiplexing*) mreža i njihove prednosti u smislu kapaciteta i kašnjenja. Poseban fokus je stavljen na analizu troškova vlasništva (eng. *Total Cost Of Ownership*, skraćeno *TCO*), uključujući kapitalne troškove (eng. *Capital expenditures*, skraćeno *CAPEX*) i operativne troškove (eng. *Operating expenses*, skraćeno *OPEX*), kroz matematički model baziran na *ILP* (eng. *Integer Linear Program*) pristupu. Model koristi heurističke algoritme, K-sredina i genetski algoritam, dok su dobijeni rezultati evaluirani putem studije slučaja sa realnim parametrima, tabelama i dijagramima.

Ključne reči – 5G tehnologija, *IoT*, *Fronthaul* mreže, *RAN* arhitektura, *TWDM-PON*, *TCO*, *CAPEX*, *OPEX*, *ILP*, Heuristički algoritam, K-sredina, Genetski algoritam, Studija slučaja.

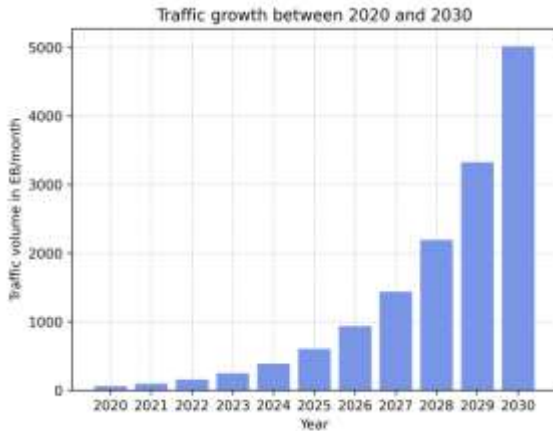
I. UVOD

Razvoj mobilnih mreža, posebno 5G tehnologije, od ključnog je značaja za podršku rastućem ekosistemu *IoT*-a. Dok mnogi *IoT* uređaji koriste bežične tehnologije poput *Wi-Fi*-ja i *Zigbee*-a, 5G nudi širu dostupnost, pouzdanost i mogućnost podrške velikom broju uređaja na većim udaljenostima. Očekuje se da će ova tehnologija transformisati digitalni ekosistem, omogućavajući aplikacije koje zahtevaju visoke brzine prenosa podataka, nisku latenciju i

¹ Vukašin Petrović, Računarski fakultet, Univerzitet Union, Knez Mihailova 6/6, Beograd, Srbija(e-mail: vpetrovic721m@raf.rs)

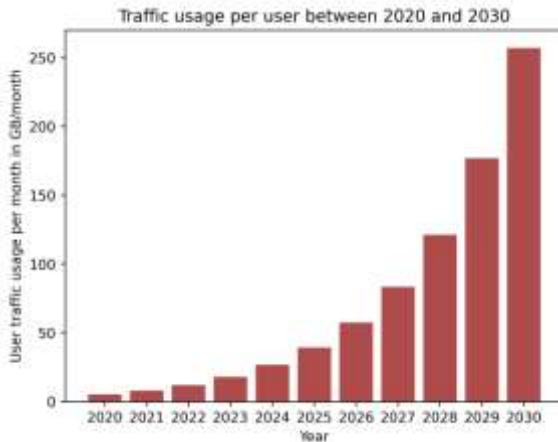
Prof. Dr. Mirjana Radivojević, Računarski fakultet, Univerzitet Union, Knez Mihailova 6/6, Beograd, Srbija(e-mail: mradoivojevic@raf.rs)

pouzdanu povezanost.



Slika 1 Predviđen mobilni saobraćaj prema izveštaju ITU-R M.2370-0.

Jedan od ključnih izazova u implementaciji 5G mreža jeste upravljanje saobraćajem između udaljenih radio jedinica (eng. *Remote Radio Unit*, skraćeno *RRU*) i centralnih jedinica (eng. *Based Units*, skraćeno *BBU*). Porast mobilnog saobraćaja, koji prema procenama ITU-R M.2370-0 treba da dostigne 5036 EB mesečno do 2030.godine, dodatno komplikuje upravljanje *fronthaul* mrežama, što je ilustrovano na slici 1.



Slika 2 Korisnička upotreba mobilnih uređaja prema izveštaju ITU-R M.2370-0.

Korisnička upotreba mobilnih podataka takođe raste, prelazeći sa 5GB u Vol. 16, 2024.

2020. na preko 250GB mesečno do 2030.godine što je prikazano na slici 2.

U ovom radu se analizira uloga optičkih *fronthaul* mreža, sa posebnim naglaskom na pasivne optičke mreže (eng. *Passive Optical Networks*, skraćeno *PON*). *PON* tehnologija omogućava visok kapacitet prenosa podataka, nisku latenciju i ekonomičnu implementaciju, čime je pogodna za povezivanje velikog broja baznih stanica i *RRU* jedinica u 5G sistemima. U radu su detaljno obrađeni ključni tehnološki i ekonomski aspekti *PON* mreža, uključujući analizu troškova vlasništva (eng. *Total Cost Of Ownership*, skraćeno *TCO*), kapitalne troškove (eng. *Capital expenditures*, skraćeno *CAPEX*) i operativne troškove (eng. *Operating expenses*, skraćeno *OPEX*), kao i matematički model optimizacije troškova implementacije.

II.ZNAČAJ 5G TEHNOLOGIJE

5G tehnologija donose revolucionarne promene u načinu na koji se komunikacije odvijaju, omogućavajući brzine prenosa podataka do 10Gbps, što rezultira bržim preuzimanjem podataka, real-time strimovanjem i novim aplikacijama u industrijama poput zdravstva, obrazovanja i transporta. Ova tehnologija omogućava povezivanje velikog broja uređaja, što je ključno za razvoj pametnih gradova i autonomnih sistema [1]. Pružanje ekonomičnih veza između velikog broja udaljenih radio glava (eng. *Remote Radio Head*, skraćeno *RRH*) na lokacijama ćelija i *BBU*-a u centralnoj lokaciji, poznato kao prednji deo mreže (eng. *fronthaul*), postavlja nove izazove u implementaciji 5G mreža [2].

Tradicionalna rešenja, poput bežičnih veza, ne mogu zadovoljiti visoke zahteve za propusnošću i niskom latencijom. Stoga su optičke tehnologije u *PON* mrežama prepoznate kao optimalno rešenje za *frontahaul* u 5G mrežama, zahvaljujući svojoj sposobnosti da obezbede veliki kapacitet prenosa i nisku latenciju [3]. U ovom radu razmatrano je vremensko i talasno multipleksiranje pasivne optičke mreže (eng. *Time Wavelength Division Multiplexing*, skraćeno *TWDM-PON*) kao *fronthaul* rešenje za implementaciju 5G tehnologije [4].

III.TEHNIČKI PREGLED *MIMO* TEHNOLOGIJA I MULTIPLEKSIRANJE

Multipleksiranje omogućava simultano slanje više signala preko jedne komunikacione linije, što efikasno koristi dostupni frekvencijski spektar. U 5G mrežama, najvažnija tehnika multipleksiranja je ortogonalno frekvencijsko multipleksiranje (eng. *OFDM*), koje deli spektar na usko raspoređene podnosače, omogućavajući simultani prenos više korisnika bez međusobnog ometanja. *OFDM* je otporan na multipath smetnje, što ga čini pogodnim za urbane sredine sa mnogim refleksijama signala [5]. Uz *OFDM*, koriste se i

druge tehnike kao što su frekvencijsko (eng. *FDMA*) i vremensko multipleksiranje (eng. *TDMA*), što dodatno optimizuje raspodelu resursa i povećava kapacitet mreže [6].

MIMO tehnologija (eng. *Multiple-Input, Multiple-Output*, skraćeno *MIMO*), posebno njena napredna verzija *mMIMO* (eng. *Massive MIMO*), koristi veliki broj antena za simultani prenos različitih podataka, što povećava kapacitet i efikasnost spektra [7]. *MIMO* omogućava prostornu raznolikost i prostorno multipleksiranje, čime se poboljšava otpornost na smetnje i povećava brzina prenosa [8]. Ove tehnike se dopunjuju naprednim algoritmima poput *Beamforminga* i *Channel State Information (CSI)*, koji optimizuju prenos podataka u realnom vremenu [9].

5G mreže takođe postižu visoku energetska efikasnost. Korišćenje naprednih algoritama omogućava baznim stanicama i uređajima da prelaze u režime niske potrošnje kada nema saobraćaja, čime se smanjuje nepotrebno trošenje energije [10]. *mMIMO* tehnologija, uz precizno usmeravanje signala (*Beamforming*), smanjuje gubitke energije i efikasnije upravlja resursima [11]. Dodatno, napredni režimi spavanja za bazne stanice smanjuju potrošnju energije tokom niske mrežne aktivnosti [12]. Optimizacija mrežne topologije i korišćenje heterogenih mreža omogućava mreži da prilagodi snagu prenosa prema gustini korisnika, čime se dodatno smanjuje potrošnja energije [13].

Fleksibilnost 5G mreže omogućava efikasno prilagođavanje različitim scenarijima upotrebe, kao što su pametni gradovi i industrijska automatizacija. Mreža može efikasno upravljati resursima i obezbediti optimalne performanse za različite aplikacije i korisnike [14]. Sposobnost prilagođavanja, uz podršku za širok spektar usluga, čini 5G ključnom tehnologijom za budući tehnološki razvoj i primenu u različitim aspektima svakodnevnog života poput transporta, komunikacija i automatizacije domaćinstava [15].

IV. VISOKE BRZINE PRENOSA PODATAKA

Ključni atribut 5G tehnologije koji se ističe kao prednost u odnosu na prethodne generacije mreža su izuzetno visoke brzine prenosa podataka. 5G tehnologija nudi brzine prenosa koje su deset puta veće od onih koje pružaju 4G mreže. Ove brzine se postižu implementacijom nekoliko ključnih tehnologija, uključujući *mMIMO* (višestruki ulazi/izlazi), *mmWave* (eng. *Millimeter wave*) frekvencijske opsege i tehnike dinamičkog raspoređivanja resursa.

Massive MIMO tehnologija koristi veliki broj antena na baznim stanicama kako bi se poboljšali kapacitet i pokrivenost mreže. Ova tehnika omogućava

simultano slanje i primanje podataka sa više korisnika, čime se povećava efikasnost korišćenja spektra [16]. Osim toga, *mmWave* frekvencije pružaju širi opseg i omogućavaju prenos podataka brzinama koje se mere u gigabitima po sekundi, ali su podložnije smanjenju opsega i uticaju okruženja [17].

Dinamičko raspoređivanje resursa u 5G mrežama omogućava optimizaciju korišćenja propusnog opsega u zavisnosti od trenutnog opterećenja, što korisnicima pruža brzine prenosa podataka u gigabitima po sekundi. Ova tehnologija omogućava trenutno učitavanje velikih fajlova, reprodukciju video sadržaja u visokoj rezoluciji i igranje online igara bez zastoja, čime se značajno poboljšava korisničko iskustvo [18][19].

V. FRONTHAUL U 5G MREŽAMA

Fronthaul predstavlja ključni deo arhitekture 5G mreža, odgovoran za povezivanje *RRU* sa *BBU*. U 4G LTE mrežama *fronthaul* je povezivao *RRH* sa *BBU*. U 5G mrežama ovaj koncept je evoluirao zbog naprednih zahteva i složenije arhitekture. U 5G mrežama *fronthaul* je ključan za omogućavanje visokih brzina prenosa podataka, niske latencije i efikasnog upravljanja mrežom. Pored toga *fronthaul* omogućava distribuciju ogromnih količina podataka između *RAN* komponenti i centralizovanih jedinica koje obavljaju složene obrade signala. To je posebno važno za podršku aplikacija koje zahtevaju nisku latenciju [20].

VI. KLJUČNI PARAMETRI TEHNO EKONOMSKE ANALIZE

TCO predstavlja ukupne troškove koji se javljaju tokom životnog ciklusa određenog sistema ili tehnologije. Ovaj koncept uključuje sve direktne i indirektne troškove, kao što su nabavka, implementacija, operacije, održavanje i eventualna dezinvesticija. U telekomunikacijama, *TCO* može obuhvatiti troškove opreme, instalacije, radne snage i podrške, kao i troškove obuke korisnika. Na primer, prilikom implementacije optičke mreže, troškovi za kablovsku infrastrukturu, uređaje i obuku osoblja mogu drastično povećati ukupne troškove vlasništva. Pored ovoga, *TCO* nije samo važan za procenu troškova, nego i za poređenje različitih rešenja ili tehnologija. Na primer, *TCO* može pomoći operaterima da procene koje rešenje nudi najbolji balans između inicijalnih troškova i dugoročnih operativnih troškova. U praktičnoj primeni, različiti *TCO* parametri mogu uticati na donošenje odluka poput korišćenja iznajmljenih resursa u odnosu na kupovinu opreme [21].

CAPEX se odnosi na troškove koji se koriste za kupovinu ili poboljšanje dugotrajne imovine.

U kontekstu telekomunikacija, to uključuje ulaganja u fizičku infrastrukturu kao što su kablovi, bazne stanice i oprema za prenos podataka. Ovi troškovi su obično jednorazni i imaju dugoročan uticaj na poslovanje. *CAPEX* se može razlikovati u zavisnosti od faza projekta. Na primer, troškovi u fazi izgradnje mogu biti znatno veći od troškova u fazi održavanja. Visok *CAPEX* može zahtevati veći povrat na investiciju, što može uticati na strategiju poslovanja operatera. U praksi, *CAPEX* se može posmatrati kao ulazna investicija koja omogućava pružanje telekomunikacionih usluga, dok se očekuje povrat kroz generisanje prihoda tokom godina [21].

OPEX se odnosi na troškove koji nastaju tokom redovnog poslovanja, uključujući troškove održavanja, operativne troškove i troškove osoblja. U telekomunikacionoj industriji, *OPEX* je od suštinske važnosti za efikasno upravljanje svakodnevnim operacijama. Na primer, redovno održavanje mrežne opreme i troškovi osoblja za korisničku podršku predstavljaju značajan deo ukupnih troškova. *OPEX* se često smatra fiksnim ili varijabilnim, što utiče na operativnu fleksibilnost kompanije. Na primer, fiksni *OPEX* može ograničiti sposobnost kompanije da reaguje na promene u potražnji. Pored ovoga, efikasno upravljanje *OPEX* troškovima može omogućiti kompanijama da smanje troškove, što može direktno uticati na profitabilnost. Razumevanje i upravljanje *OPEX*-om je ključno za maksimizaciju profitabilnosti i održavanje konkurentске prednosti na tržištu [22].

Razumevanje *TCO*, *CAPEX* i *OPEX* omogućava donosiocima odluka da strateški planiraju resurse, identifikuju potencijalne rizike i optimizuju troškove. Kroz analizu ovih parametara, telekomunikacione kompanije mogu bolje prilagoditi svoje projekte kako bi ostvarile maksimalan povrat na investicije i minimizovale ukupne troškove. Na primer, korišćenje fleksibilnih mrežnih arhitektura može smanjiti kapitalne i operativne troškove, čime se povećava efikasnost i smanjuje vreme potrebno za implementaciju [21].

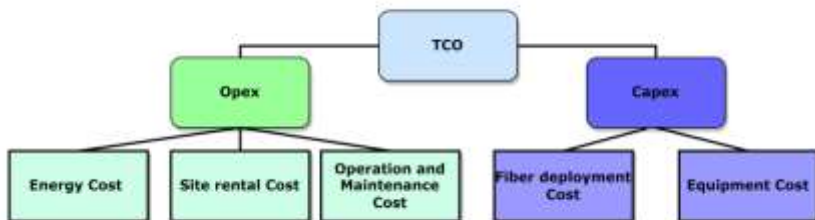
VII. MODEL TROŠKOVA

Model troškova koji se koristi u ovom istraživanju zasnovan je na ukupnim troškovima *TCO* i pokriva kako *CAPEX* tako i *OPEX* povezane sa *TWDM-PON* tehnologijom u *fronthaul* mrežama za 5G. Ovaj model obuhvata sve elemente potrebne za implementaciju i operaciju mreže, pretpostavljajući da jedan operater poseduje kompletnu infrastrukturu i da ne postoji deljenje kapaciteta ili zakup optičkih vlakana.

TCO se izračunava kao zbir *CAPEX*-a i *OPEX*-a kroz vremenski period, pri čemu se za jednu godinu operacija koristi sledeća formula:

$$TCO = Capex + Nr \cdot Opex \quad (1)$$

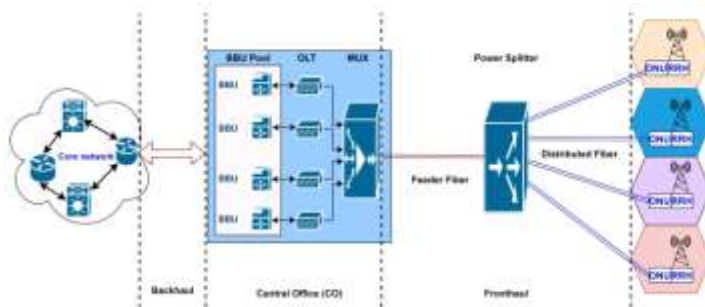
Gde je Nr broj godina. U ovom slučaju, razmatra se samo jedna godina operacija, ali model omogućava projekciju troškova za više godina linearnim povećanjem $OPEX$ -a. Na ovaj način, operateri mogu precizno predvideti dugoročne troškove i strategijski planirati investicije i resurse, kao što je prikazano na slici 3 [23].



Slika 3 Model za izračunavanje TCO vrednosti.

VIII. FORMULA *ILP*-A I HEURISTIČKA REŠENJA

Program celobrojnog linearnog programiranja (*ILP*) predstavlja moćan alat za optimizaciju resursa i troškova u telekomunikacijama, posebno u kontekstu *CRAN* arhitekture koja koristi *TWDM-PON* kao *fronthaul* rešenje (slika 4).



Slika 4 Arhitektura radio pristupne mreže u oblaku.

Pravilna formulacija *ILP*-a omogućava efikasno raspoređivanje resursa i minimizaciju ukupnih troškova. Implementacija *ILP*-a u ovom okviru uključuje nekoliko ključnih koraka:

1. Definisavanje promenljivih – U ovoj fazi identifikuju se sve relevantne promenljive, poput lokacija *RRH*, *BBU pool*, power splitter i *ONU* uređaja. Svaka komponenta ima svoj kapacitet i troškove povezane s razmeštajem, što se mora uzeti u obzir.
2. Definisavanje ograničenja – Formulisu se ograničenja koja osiguravaju da se resursi koriste u skladu s pravilima mrežne arhitekture. Ovo obuhvata maksimalnu dozvoljenu udaljenost između mrežnih elemenata i kapacitete uređaja, kako bi se osigurala stabilnost i efikasnost mreže.
3. Definisavanje ciljne funkcije – *ILP* model ima cilj da minimizuje *TCO*, uključujući troškove instalacije, održavanja, operativne troškove i troškove korisničke opreme (*ONU*).
4. Optimizacija i evaluacija – Nakon definisanja parametara, *ILP* model se rešava korišćenjem odgovarajućih alata. Rešenja se evaluiraju i porede s heurističkim metodama koje nude brža, ali potencijalno manje optimalna rešenja.

Primer *ILP*-a omogućava značajno smanjenje troškova i povećanje efikasnosti mreže. Model identifikuje optimalne konfiguracije, osigurava pravilnu povezanost korisnika i omogućava najbolje korišćenje resursa. Kroz *ILP* moguće je ostvariti visoku fleksibilnost i prilagodljivost mrežnim uslovima, što je ključno za uspeh savremenih telekomunikacionih mreža.

Formulacija *ILP*-a uključuje sledeće ulaze: lokacije *RRH*-ova, potencijalne lokacije *BBU pool*-ova, lokacije power splitter-a, kapacitet *BBU* uređaja, faktor deljenja, maksimalnu dozvoljenu udaljenost između mrežnih komponenti i različite troškovne vrednosti. Cilj je minimizacija ukupnih troškova vlasništva *TCO*-a.

U narednim poglavljima analiziraće se optimizacija i modeliranje mrežnog razmeštaja korišćenjem *ILP*-a i heurističkih metoda. Ova analiza će obuhvatiti ključne mrežne elemente i ulazne podatke, uključujući lokacije *RRH*-ova i *BBU pool*-ova, kapacitete uređaja i troškovne parametre. Posebna pažnja biće posvećena formulaciji ciljnih funkcija, koje definišu optimizacione ciljeve kao što je minimizacija *TCO*-a, uzimajući u obzir infrastrukturne i operativne troškove, kao i performanse mreže.

Heuristički pristupi, poput K-sredina algoritma za klasterovanje i genetskog algoritma, biće takođe predstavljeni kao alternativne metode za rešavanje problema raspodele resursa. Ovi pristupi omogućavaju brzo pronalaženje

zadovoljavajućih rešenja, posebno u slučajevima kada *ILP* zahteva previše vremena i resursa za optimizaciju.

IX. STUDIJA SLUČAJA I NUMERIČKI REZULTATI

U ovom delu koristimo predloženi *ILP* model, *K-sredina* i *GA* rešenja za dizajn optičkog *fronthaul* za 5G sisteme i buduće mreže na isplativ način kako bismo demonstrirali njihovu primenljivost. Razmatramo dva scenarija implementacije - slika 5:

1. Jedan sa veličinom od $5 \times 5 \text{ km}^2$ (gusti scenarijo – gustina antena)
2. Jedan sa veličinom od $20 \times 20 \text{ km}^2$ (retki scenarijo).



Slika 5 Razlika između $5 \times 5 \text{ km}^2$ i $20 \times 20 \text{ km}^2$ gustine pokrivenosti.

A. Parametri simulacije

Simulacije su izvršene kako bi se procenila efikasnost naših rešenja. Da bi se rešio predloženi *ILP* korišćeni su komercijalno dostupan *CPLEX* solver [24] i *Python* programiranje za *K-sredinu* i *GA* algoritme. Sve simulacije su sprovedene koristeći mašinu sa Intel(R) Core(TM) i5-1035G1 CPU @ 1.00 GHz i 8 GB RAM-a. Uzimajući to u obzir, za rešavanje *ILP* modela broj *RRU* je bio 34, što je bio maksimalan broj sa kojim je *ILP* mogao skalirati. Zatim su procenjene performace heurističkih algoritama razmatrajući različite brojeve *RRU*-ova, tj. 50, 100, 150 i 200. Kapacitet koji *RRH* može podržati je pretpostavljen na 2.5 Gbps. Razmatrane su tri različite proporcije razdvajanja (1:4, 1:8 i 1:16), a *TWDM-PON* je imao kapacitet od 40 Gbps za downlink i uplink (simetrična arhitektura). Iako predložena rešenja mogu pružiti optimalan broj potrebnih *BBU pool*-ova, u ovom radu je pretpostavljeno da je

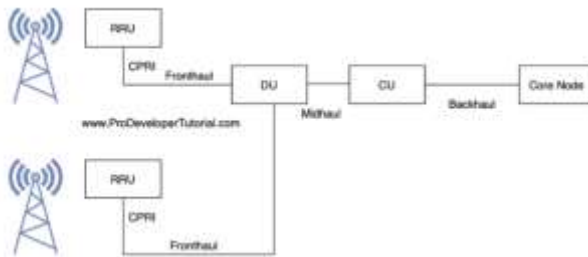
dozvoljena izgradnja samo jedne *BBU pool* lokacije. Pri proceni performansi ovih rešenja, razmatrane su različite vrednosti parametara, koje su prikazane u Tabeli 1. Ove vrednosti su izabrane iz više studija [23], [25], [26], [27]. Međutim, navedeni parametri se mogu lako menjati na osnovu podataka koje pruža operater.

Parameter	Value
C_f	USD 20 per m (USD 4 for purchase and 16 for trenching) [25]
C_λ	$2500\sqrt{\lambda}$, where λ is the number of wavelengths (here 4)
C_p	USD 75000 [25]
C_l	USD 3600 [27]
C_w	USD 3500 [25]
C_o	$500 + 70 \log_2(\text{number of output ports})$ [51]
C_{sp}	USD (30, 50, 100) for (1:4, 1:8, 1:16) splitting ratios, respectively [25]
$C_{o\&M}$	10% of equipment cost [37]
C_{se}	USD 8000 per year per RRH [25]
E	USD 0.15 per Watt
E_j	100 W [25]
E_w	155 W [25]
E_e	104 W [25]
I_{total}	500 W [25]
w	10 RRHs
Mutation probability	0.05
Crossover probability	0.8
Number of replications	100

Tabela 1 Vrednosti parametara.

B. Rezultati i diskusija

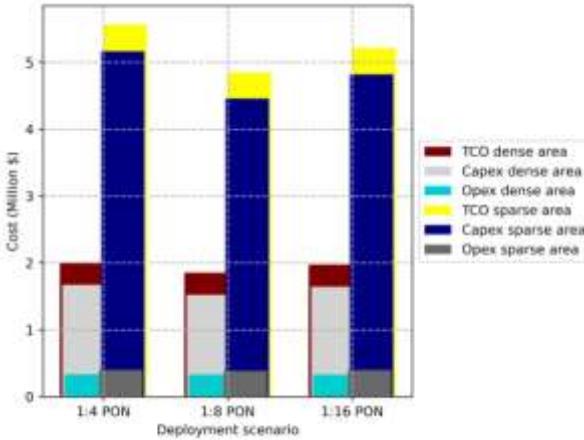
Slika 6 prikazuje raspad optimalnog ukupnog troška mreže u retkim i gustim područjima uzimajući *PON* kao *fronthaul* sa različitim odnosima podele (1:4, 1:8 i 1:16). Možemo primetiti da korišćenje *PON* tehnologija sa odnosom podele 1:8 rezultira najefikasnijom arhitekturom sa aspekta troška.



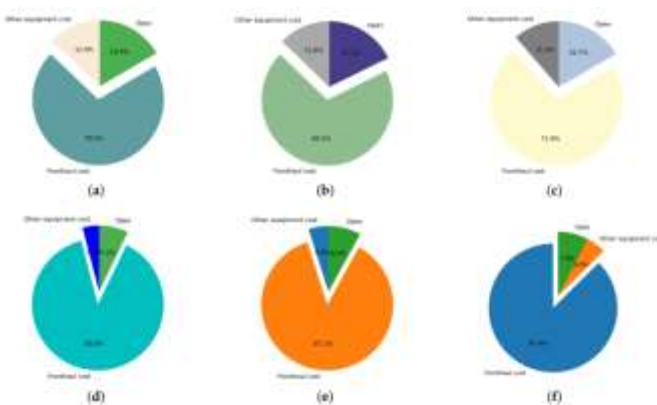
Slika 6 Primer pristupne mreže - *Fronthaul*.

U retkom području, upotreba 1:8 *PON*-a može uštedeti do 13% u odnosu na 1:4 *PON* i do 7.13% u donosu na 1:16 *PON*, dok u gustom području može uštedeti do 8% u odnosu na 1:4 *PON* i do 6.6% u odnosu na 1:16 *PON*.

U scenariju retkog razmeštaja, *Capex* dostiže do 93% od ukupnog troška *TCO*, dok u scenariju gustog razmeštaja dostiže do 83.3% *TCO*. Razlog je što su udaljenosti u retkom području veće nego u gustom području, što objašnjava veće troškove za postavljanje dužih razdaljina optičkih kablova. Slika 7 ilustruje optimalne raspodele troškova u scenarijima gustog i retkog razmeštaja sa različitim *PON* tehnologijama. Jasno je da je trošak *fronthaul*-a najdominantniji zbog visokih investicija potrebnih za postavljanje optičkih vlakana. Detaljne vrednosti troškova sa slike 8 su objašnjene u Tabeli 2.



Slika 7 Optimalni trošak u odnosu na scenario razmeštaja za retka i gusta područja.

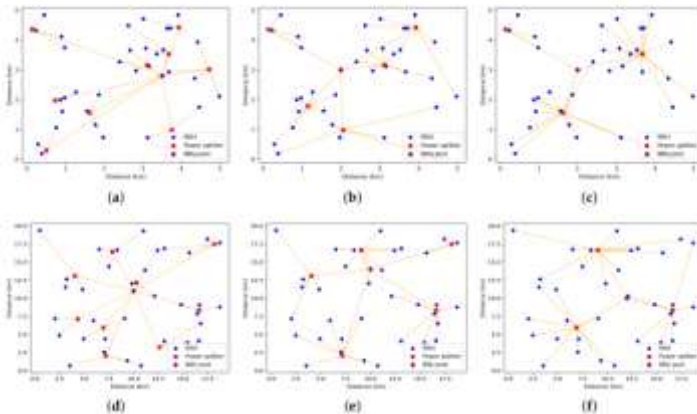


Slika 8 Raspored ukupnog troška za retka i gusta područja.

Deployment Area	Dense			Sparse		
PON architecture	1:4	1:8	1:16	1:4	1:8	1:16
Fronthaul cost $\times 10^5$ (USD)	14.15	12.88	14.12	42.39	42.21	45.60
Opex $\times 10^5$ (USD)	3.33	3.29	3.28	3.99	3.96	3.86
Other equipment cost $\times 10^5$ (USD)	2.59	2.37	2.25	2.59	2.37	2.25

Tabela 2 Raspad optimalnog troška za scenarije retkog i gustog razmeštaja.

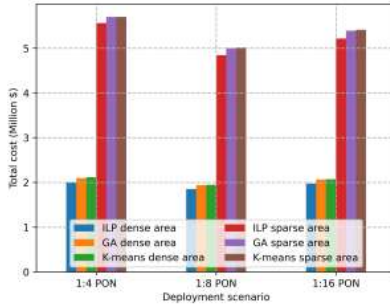
Slika 9 ilustruje optimalne rasporede *fronthaul*-a koje pruža *ILP* za testiranje područja, uzimajući u obzir *TWDM-PON* sa različitim odnosima podele 1:4, 1:8 i 1:16 kao *fronthaul*. Plave tačke predstavljaju lokacije *RRH*-a, crveni kvadrati predstavljaju lokacije *splitter*-a, a ljubičasti romb predstavljaju *BBU pool* lokaciju. Narandžaste isprekidane linije predstavljaju optičke veze vlakana.



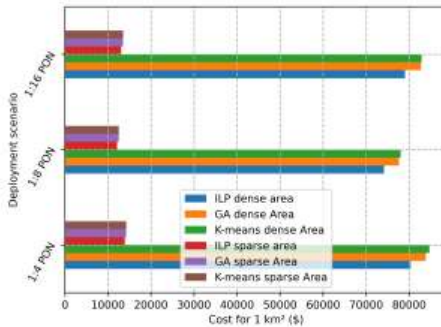
Slika 9 Optimalno razmeštanje mreže za proučena područja.

Slika 10 prikazuje upoređivanje performansi predloženog *K*-sredina klasterovanja i *GA* sa optimalnim troškom koji pruža *ILP* rešenje za retke i guste oblasti rasporeda. Možemo primetiti da *K*-sredina i *GA* daju slične rezultate kao *ILP* kada je broj *RRH* jednak 34, što je maksimalni broj sa kojim predloženi *ILP* može da skalira. *GA* pruža približnu performansu od 3.8% u odnosu na *ILP*, dok *K*-sredina nudi približnu performansu od 4.2% u odnosu na optimalno rešenje. Slika 11 prikazuje tačne potrebne troškove za

postavljanje kvadratne površine veličine 1 km² ili u retkoj ili u gustomj oblasti rasporeda. Ove vrednosti pružamo kao jedinice troška kako bismo pomogli mobilnim operatorima (eng. *Mobile Network Operator*, skraćeno *MNO*) da izračunaju približne troškove potrebne za postavljanje većih površina.



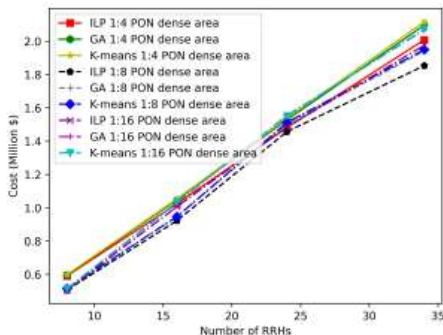
Slika 10 ukupan trošak u odnosu na scenario rasporeda.



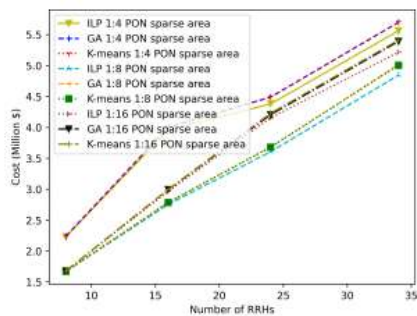
Slika 11 Ukupan trošak u odnosu na scenario rasporeda za postavljanje 1 km².

U slikama 12 i 13 prikazana je razlika u optimalnosti između rešenja *K*-sredine klasterovanja, rešenja *GA* i optimalnog rešenja dobijenog korišćenjem komercijalnog softvera za rešavanje složenih matematičkih problema (eng. *Commercial software tool used for solving complex mathematical problems*, skraćeno *IBM ILOG CPLEX*). Rezultati su Slici 16 su dobijeni za gustu oblast rasporeda sa različitim veličinama mreže (8, 16, 24 i 34), uzimajući u obzir *PON* sa različitim odnosima podele (1:4, 1:18 i 1:16), dok se rezultati prikazani na slici 4 odnose na retku oblast razmeštaja. Može se primetiti da se rešenja *K*-sredina i *GA* podudaraju sa optimalnim rešenjem za male veličine mreže. Međutim, razlika u optimalnosti raste sa porastom veličine mreže. Ovo se

dešava jer se sa porastom veličine mreže povećava i veličina pretrage, što otežava *K*-sredinama i *GA* da pronađu optimalno rešenje.

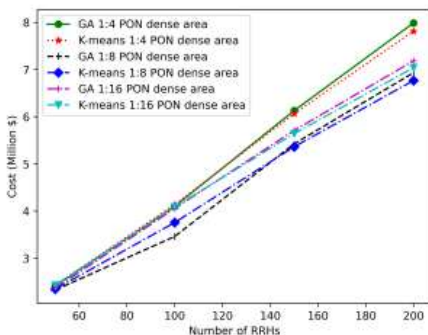


Slika 12 Upoređivanje rešenja *GA* i *K*-sredina sa rešenjem *ILP* u scenariju guste oblasti.

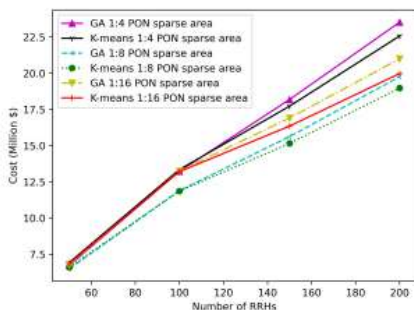


Slika 13 Upoređivanje rešenja *GA* i *K*-sredina sa rešenjem *ILP* u scenariju retke oblasti.

Slike 14 i 15 ilustruju ukupni trošak *TCO*-a potreban za retke i guste oblasti, redom, kada se broj *RRU*-ova menja od 50 do 200, uzimajući u obzir *PON* sa različitim odnosima podele (1:4, 1:8, 1:16). Svi rezultati na ovim slikama dobijeni su primenom *K*-sredina i *GA*, gde *ILP* rešenje ne može da skalira kada je broj *RRH*-ova veći od 34. Možemo primetiti da je *GA* karakterizovan boljim performansama u poređenju sa *K*-sredinama kada je broj *RRH*-ova manji od 140, dok *K*-sredine daju bolje rezultate za veći broj *RRH*-ova u poređenju sa *GA* (2.25% i 4.52% bolje performanse za 200 *RRU*-ova u gustim i retkim



Slika 14 Varijacija ukupnog troška TCO za različit broj RRU u scenariju guste oblasti.



Slika 15 Varijacija ukupnog troška TCO za različit broj RRU u scenariju retke oblasti.

X.ZAKLJUČAK

Optimizacija troškova optičkog *fronthaul* za 5G mreže, koristeći *TWDM-PON* sa različitim odnosima podele, ključna je za budući razvoj mobilnih mreža. ILP model omogućava minimizaciju TCO -a i optimalno razmeštanje mrežnih komponenti, dok heuristički algoritmi, poput K-sredina klasterovanja i Genetskog algoritma, nude efikasnija rešenja u slučajevima sa velikim brojem elemenata. Ova rešenja omogućavaju operaterima efikasno planiranje i optimizaciju mreža, uzimajući u obzir specifične teritorijalne i uslužne zahteve.

Kao budući pravac istraživanja, preporučuje se istraživanje alternativa poput

mikrotalasa i optike slobodnog prostora, kao i zajednička optimizacija radio i optičkog transporta u 5G/6G mrežama.

XI. LITERATURA

- [1] M. K. A. Khan, S. (2020). An Overview of Passive Optical Networks and Their Role in 5G Fronthaul. *IEEE Access*, 8, 105237-105254. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2990823.
- [2] Gupta, V., & Jha, R. (2015). A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies. *IEEE Access*, 3, 1206-1232. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2436402.
- [3] Kim, D., & Park, J. (2020). The Role of Optical Networks in 5G Fronthaul and Backhaul. *Optics Express*, 28(10), 14880-14893. DOI: 10.1364/OE.394611.
- [4] Yang, Z., & Zhang, L. (2021). Next Generation Optical Networks for 5G: Recent Advances and Future Directions. *IEEE Communications Magazine*, 59(3), 62-67. DOI:
- [5] Goldsmith, A. (2005). *Wireless Communications*. Cambridge University Press.
- [6] J. G. Proakis. (2001). *Digital Communications*. McGraw-Hill.
- [7] Larsson, E. G., et al. (2014). Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), 186-195.
- [8] Zheng, K., et al. (2015). An Overview on Low-Latency Wireless Network Techniques for 5G: Challenges and Solutions. *IEEE Access*, 3, 1206-1219.
- [9] Li, Q. C., et al. (2014). 5G Network Capacity: Key Elements and Technologies. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 9(1), 71-78.
- [10] D. P. Thapa, A. K. Gupta, and V. V. Karamchandani. "Energy-Efficient Techniques for 5G Network: A Review." *International Journal of Electronics and Communications*, vol. 108, pp. 10-20, 2019.
- [11] T. L. Marzetta. "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas." *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, 2010.
- [12] A. A. H. A. M. N. Alshahrani, et al. "Energy Efficiency in 5G Networks: A Survey." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 1, pp. 756-793, 2018.
- [13] G. P. Fettweis and T. Zimmermann. "ICT Energy Consumption—Trends and Challenges." *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 1, pp. 55-61, 2010.
- [14] IEEE. "5G and IoT: A Symbiotic Relationship." *IEEE Communications Magazine*, dostupno na <https://ieeexplore.ieee.org/document/8724790> (pristupljeno: februar, 2023).
- [15] Qualcomm. "5G Technology: Low Latency for Mission-Critical Applications." Qualcomm, dostupno na <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/5g-technology-low-latency-for-mission-critical-applications.pdf> (pristupljeno: maj, 2024).
- [16] Massive MIMO: A Key Technology for 5G Wireless Networks.
- [17] Understanding Millimeter Wave Technology for 5G.
- [18] Dynamic Resource Allocation Techniques in 5G Networks.
- [19] Qualcomm. "What is 5G? Understanding the Next-Gen Wireless System." Qualcomm, dostupno na <https://www.qualcomm.com/5g/what-is-5g> (pristupljeno: februar, 2023).

- [20] Dahlman, E., Parkvall, S., & Skold, J. (2018). 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. Academic Press.
- [21] Cost evaluation of NGOAN.
- [22] Techno-economic analysis for Rural Broadband Access Networks.
- [23] Fayad, A.; Jha, M.; Cinkler, T.; Rak, J. Planning a Cost-Effective Delay-Constrained Passive Optical Network for 5G Fronthaul. In Proceedings of the 2022 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), Warsaw, Poland, 16–19 May 2022; pp. 1–6.
- [24] IBM Documentation. Available online: www.ibm.com/docs/en/icos/12.10.0 (accessed on 11 November 2022).
- [25] Jaffer, S.S.; Hussain, A.; Qureshi, M.A.; Mirza, J.; Qureshi, K.K. A low cost PON-FSO based fronthaul solution for 5G CRAN architecture. *Opt. Fiber Technol.* 2021, 63, 102500. [CrossRef]
- [26] Masoudi, M.; Lisi, S.S.; Cavdar, C. Cost-effective migration toward virtualized C-RAN with scalable fronthaul design. *IEEE Syst. J.* 2020, 14, 5100–5110. [CrossRef]
- [27] De Andrade, M.; Buttaboni, A.; Tornatore, M.; Boffi, P.; Martelli, P.; Pattavina, A. Optimization of long-reach TDM/WDM passive optical networks. *Opt. Switch. Netw.* 2015, 16, 36–45. [CrossRef]

Abstract

In the rapidly expanding world of the Internet of Things (IoT), the number of devices connected to IP networks is expected to surpass the global population by the end of 2024. This growth is driven by advancements in mobile communication, particularly 5G technology. The increasing device connectivity has led to more RRU (Remote Radio Head) antenna sites and higher traffic volumes requiring efficient transmission to centralized BBU (BaseBand Unit) units. However, the fronthaul network connecting RRU and BBU units faces challenges due to traffic volume, connection density, and quality-of-service demands. Passive Optical Networks (PON) have emerged as a promising solution for these issues, offering cost-effective components, high link capacity, and low latency, making them ideal for integration with 5G systems.

This paper explores the significance of 5G for IoT development and examines optical fronthaul networks in this context. It analyzes radio access network (RAN) architectures, including centralized RAN (CRAN), and reviews fronthaul systems and TWDM PON networks within 5G architectures. The thesis also focuses on minimizing the Total Cost of Ownership (TCO) in 5G implementations by optimizing capital (CapEx) and operational expenditures (OpEx). A mathematical model using the Integer Linear Program (ILP) approach is proposed, along with two heuristic algorithms: K-means clustering and Genetic Algorithm (GA). These algorithms are evaluated

eRAF Journal on Computing

through a case study, incorporating real-world implementation parameters. Results are presented with diagrams, tables, and figures, offering insights into the methodology's practical implications.

**TECHNO – ECONOMIC ANALYSIS OF OPTICAL FRONTHAUL
NETWORK IMPLEMENTATION IN 5G-SYSTEMS**

Vukašin Petrović, Mirjana Radivojević