

IMPLEMENTACIJA MODELA ZA RUTIRANJE I ALOKACIJU PROPUSNOG OPSEGA KOD ELASTIČNIH OPTIČKIH MREŽA

Goran Marković¹, Ivana Stefanović², Snežana Mladenović¹

¹Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet,
g.markovic@sf.bg.ac.rs, snezanam@sf.bg.ac.rs

²Akademija tehničko-umetničkih strukovnih studija Beograd – Odsek Visoka škola
elektrotehnike i računarstva, ivanas@gs.viser.edu.rs

Rezime: Radi što efikasnijeg korišćenja raspoloživih mrežnih resursa i prevazilaženja problema poput fiksne širine kanala i maksimalne brzine prenosa, u optičkim telekomunikacijama, uvodi se koncept elastičnih optičkih mreža. Problem rutiranja i alokacije propusnog opsega predstavlja ključni izazov prilikom implementacije elastičnih optičkih mreža. U okviru ovog rada razmatrani su različiti algoritmi koji se najčešće primenjuju prilikom alokacije propusnog opsega, u statičkom režimu rada, pri različitom saobraćajnom opterećenju. Implementirana su tri modela koji obuhvataju različite pristupe dodele frekvencijskih slotova. Kreirani modeli, pored poređenja performansi, omogućavaju i detaljnu analizu saobraćaja, uključujući pregled korišćenih alternativnih ruta i opterećenje linkova u mreži. Na primeru jedne mreže detaljno je objašnjen postupak određivanja optimalnog broja alternativnih ruta u slučaju rutiranja po višetrukim putanjama. Određivanje optimalnog broja ruta za svaku konekciju u mreži omogućava znatno smanjenje vremena potrebnog za alokaciju propusnog opsega, pri čemu ne dolazi do degradacije ostalih performansi modela.

Ključne reči: elastične optičke mreže, rutiranje, alokacija propusnog opsega, optimizacija

1. Uvod

Optički komunikacioni sistemi koji su trenutno u upotrebi baziraju se na primeni talasnog multipleksiranja, WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). Primenjuju se CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*) i DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) tehnologije koje podrazumevaju različiti razmak između kanala, a samim tim i broj kanala. Kod CWDM sistema razmak između kanala iznosi 20 nm i dostupno je 18 optičkih kanala [1]. Za razliku od CWDM sistema, DWDM sistemi podrazumevaju znatno užu razmak između kanala, tipično 0.8 i 0.4 nm, čime se broj kanala povećava na 40, odnosno 80 [2]. Najveći nedostatak WDM sistema je fiksna širina kanala. Fiksna širina kanala ne omogućava dovoljno efikasnu upotrebu dostupnog spektralnog opsega, a takođe ograničava maksimalne brzine prenosa koje se mogu postići. Potencijalno rešenje za razvoj optičkih mreža naredne generacije su elastične

optičke mreže, EON (*Elastic Optical Networks*) [3]. Prelazak na EON nudi niz prednosti u odnosu na tradicionalne WDM sisteme, uključujući povećanje spektralne efikasnosti, fleksibilnosti i skalabilnosti i smanjenje operativnih troškova. U okviru EON uvodi se koncept frekvencijskih slotova, širine 25 GHz, 12.5 GHz i 6.25 GHz, a podržana je agregacija slotova u kanal čiji propusni opseg odgovara saobraćajnim zahtevima. Smanjenje širine kanala dovodi do efikasnije upotrebe raspoloživog spektra, dok se problem ograničenja propusnog opsega fiksnog kanala prevazilazi agregacijom susednih frekvencijskih slotova.

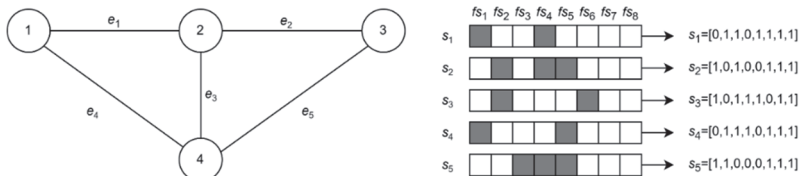
Ključni izazov prilikom implementacije EON je problem rutiranja i alokacije propusnog opsega, RSA (*Routing and Spectrum Allocation*) problem. U okviru ovog rada razmatrani su različiti aspekti RSA problema. Dat je pregled i izvršeno je poređenje različitih metoda rutiranja, kao i algoritama za alokaciju propusnog opsega. Detaljno je analiziran saobraćaj i objašnjen je postupak određivanja optimalnog broja alternativnih ruta za model sa najboljim performansama. Na kraju rada sumirani su najznačajniji rezultati i dat je pregled potencijalnih modifikacija pristupa za rešavanje RSA problema.

2. Problem rutiranja i alokacije propusnog opsega

Prvi deo RSA problema se odnosi na rutiranje, odnosno izbor odgovarajuće putanje za prenos podataka od izvornog do odredišnog čvora. Prema [4] kod EON najčešće se koristi fiksno i alternativno rutiranje. U slučaju fiksnog rutiranja, za svaki par čvorova EON, definiše se tačno jedna ruta za uspostavljanje konekcije, dok se u slučaju alternativnog rutiranja obično definiše nekoliko potencijalnih ruta koje se mogu koristiti za prenos podataka. Princip fiksnog rutiranja je jednostavnije rešenje, jer se prilikom dodele propusnog opsega razmatra isključivo jedna putanja. Sa druge strane fiksno rutiranje je manje pouzdano i fleksibilno u odnosu na alternativno rutiranje. Pored fiksnog i alternativnog rutiranja koriste se i druge metode poput iscrpljujućeg i adaptivnog rutiranja. Metode fiksnog, alternativnog, iscrpljujućeg i adaptivnog rutiranja poređene su u [5] sa aspekta verovatnoće blokiranja zahteva i prosečnog utrošenog vremena. Prema [5] najbolji rezultati sa najnižom verovatnoćom blokiranja zahteva dobijeni su u slučaju adaptivnog rutiranja, ali sa najvišim prosečnim utrošenim vremenom izvršenja. Uprkos najnižoj verovatnoći blokiranja zahteva, autori u [5] izdvajaju alternativno rutiranje kao kompromis između kompleksnosti i verovatnoće blokiranja zahteva. Primena alternativnog rutiranja kod EON i RSA problema podržana je strane velikog broja istraživanja [4-6].

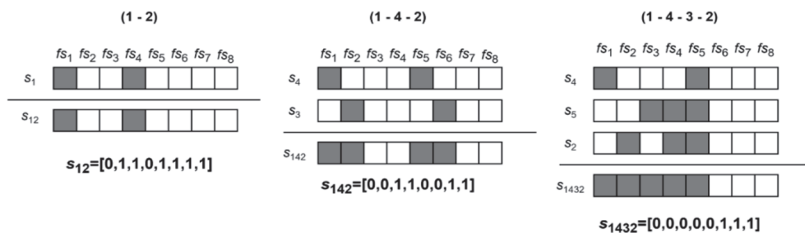
Drugi deo RSA problema odnosi se na alokaciju propusnog opsega, odnosno dodeljivanje frekvencijskih slotova. U okviru EON uvodi se koncept frekvencijskih slotova, koji se mogu posmatrati kao podkanali tipične širine 12.5 GHz. Elastičnost mreže omogućena je agregacijom podkanala, odnosno spajanjem susednih frekvencijskih slotova u kanal odgovarajuće širine u skladu sa zahtevanim protokom. U okviru DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) mreža svakom saobraćajnom zahtevu dodeljuje se kanal fiksne širine, koja tipično iznosi 50 GHz ili 100 GHz. Ovakav način alokacije propusnog opsega nije dovoljno efikasan i ne omogućava racionalnu upotrebu mrežnih resursa, jer je kapacitet kanala često veći od zahtevanog [3]. Takođe, fiksna širina kanala ograničava maksimalni bitski protok koji se može ostvariti po kanalu. Agregacijom podkanala, u okviru EON, postiže se znatno efikasnije korišćenje dostupnog propusnog opsega u skladu sa saobraćajnim zahtevima. Takođe, tako se prevazilazi

ograničenje u pogledu maksimalne brzine prenosa podataka. Dodela propusnog opsega je izazovna zbog dinamične promene zahteva i zauzeća frekvencijskih slotova. Prilikom zauzeća frekvencijskih slotova i kreiranja kanala u skladu sa zahtevima neophodno je ispuniti ograničenje susedstva i kontinuiteta frekvencijskih slotova [7]. Dakle, prilikom uspostavljanja konekcije između izvornog i odredišnog čvora neophodno je korišćenje istih frekvencijskih slotova duž cele rute, na svim linkovima, pri čemu slotovi moraju biti susedni kako bi mogla da se izvrši agregacija slotova. Na Slici 1 dat je primer jedne manje elastične optičke mreže sa četiri čvora $N=\{1, 2, 3, 4\}$ i pet grana $E=\{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$, na kojoj će biti ilustrovan postupak agregacije slotova u skladu sa ograničenjem susedstva i kontinuiteta frekvencijskih slotova. Takođe, na Slici 1, prikazano je zauzeće frekvencijskih slotova za svaki link u vidu nizova s_i .



Slika 1. Ilustracija elastične optičke mreže i zauzeća frekvencijskih slotova

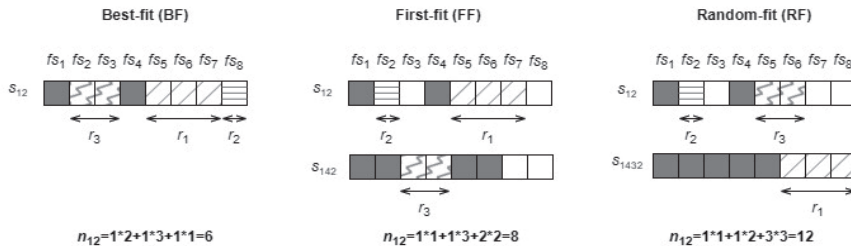
Neka je potrebno uspostaviti konekciju između čvorova 1 i 2. Konekcija između čvorova 1 i 2 može se ostvariti na 3 načina, korišćenjem direktne putanje između čvorova 1 - 2, kao i putanjama 1 - 4 - 2 i 1 - 4 - 3 - 2, koje uključuju veći broj linkova za uspostavu konekcije. Proces određivanja potencijalnih dostupnih frekvencijskih slotova za svaku rutu ilustrovan je na Slici 2. U slučaju kada uspostava konekcije obuhvata više od jednog linka, određivanje potencijalnih dostupnih frekvencijskih slotova vrši se logičkim množenjem odgovarajućih elemenata nizova s_i .



Slika 2. Ilustracija procesa određivanja potencijalnih dostupnih frekvencijskih slotova

Nakon pronalaska potencijalnih slotova za agregaciju se koriste različiti pristupi poput FF (*First Fit*), LF (*Last Fit*), RF (*Random Fit*), BF (*Best Fit*), RSAF (*Reusable Spectrum Allocation First*), koji su detaljno objašnjeni u [4]. U okviru ovog rada razmatrani su FF, RF i BF algoritmi. U slučaju FF metode zauzima se prva grupa frekvencijskih slotova koja zadovoljava zahteve u pogledu broja slotova za uspostavljanje konekcije. U slučaju RF metode zauzima se slučajno odabrana grupa slotova u skladu sa zahtevanim propusnim opsegom. Za razliku od FF i RF metode, BF metoda je zahtevnija, jer se nakon pronalaska slobodnih slotova vrši sortiranje grupa slotova, prema broju slotova, u opadajućem poretku. Zatim se pretražuje da li postoji grupa slotova čiji je propusni opseg identičan zahtevanom. Ukoliko ne postoji takva grupa slotova, zauzima se prva veća grupa susednih slotova. Na Slici 3 ilustrovan je postupak zauzeća slotova

primenom BF, FF i RF metoda u skladu sa zahtevima $r_1=\{1, 2, 3\}$, $r_2=\{1, 2, 1\}$ i $r_3=\{1, 2, 2\}$. Zahtevi su zadati u obliku torke $r_i=\{o_i, d_i, n_i\}$, gde o_i odgovara izvornom čvoru, d_i određišanom čvoru, a n_i odgovara broju zahtevanih slotova. Takođe, na Slici 3, naznačen je i broj korišćenih slotova, koji se za svaki zahtev dobija množenjem broja korišćenih slotova i linkova. Sa Slike 3 se može uočiti značajna razlika u broju korišćenih slotova za uspostavljanje konekcije. Najbolje rešenje dobijeno je primenom BF algoritma, dok je u slučaju RF algoritma korišćeno čak duplo više slotova za ispunjenje istih saobraćajnih zahteva.



Slika 3. Ilustracija zauzeća frekvencijskih slotova primenom BF, FF i RF metoda

3. Razvoj i implementacija modela za rutiranje i alokaciju propusnog opsega

Prilikom rešavanja problema rutiranja i alokacije propusnog opsega koriste se različiti pristupi. Problemi se mogu razmatrati pojedinačno, nezavisno jedan od drugog, ili objedinjeno. Takođe, RSA problem se tipično razmatra u dva različita režima rada, statički (*offline*) i dinamički (*online*). Statički i dinamički režim rada se razlikuju po tome da li su saobraćajni zahtevi poznati unapred, kao i po trajanju zahteva, odnosno vremena zauzeća kanala. U slučaju *offline* režima, koji je tipičan režim prilikom planiranja EON, zahtevi su poznati unapred i smatra se da je trajanje zahteva beskonačno, odnosno nakon zauzeća kanala, kanal je trajno zauzet [8]. U okviru ovog rada prilikom implementacije modela za alokaciju propusnog opsega korišćeno je fiksno i alternativno rutiranje u kombinaciji sa BF, FF i RF metodama alokacije propusnog opsega. Odnosno, problem rutiranja i problem alokacije propusnog opsega razmatrani su objedinjeno, u statičkom režimu rada.

Razvoj i implementacija modela za rutiranje i alokaciju propusnog opsega EON primenom BF, FF i RF algoritama izvršena je u programskom jeziku *Python* u *Google Colab* okruženju. Razvoj modela obuhvata sledeće korake:

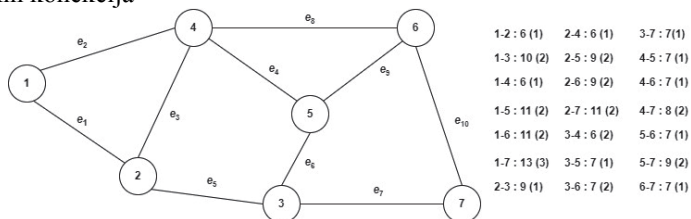
- Generisanje EON definisanjem matrice incidencije od strane korisnika.
- Za svaki par čvorova u mreži pronalaženje mogućih putanja za uspostavljanje optičke konekcije i sortiranje putanja u rastućem poretku na osnovu broja linkova koji se koriste za uspostavljanje konekcije.
- Odabir alternativnih ruta koje će biti razmatrane za uspostavljanje konekcije.
- Generisanje 64 frekvencijskih slotova za svaki link u okviru definisane EON.
- Generisanje slučajnog početnog zauzeća frekvencijskih slotova, tako da je u svakom linku zauzeto 25% frekvencijskih slotova.
- Generisanje zahteva za alokaciju propusnog opsega koje je moguće izvršiti na dva načina. Prvi način obuhvata slučajno generisanje zahteva pri čemu korisnik definiše broj zahteva, ukupan broj frekvencijskih slotova za sve zahteve, kao i

minimalni i maksimalni broj frekvencijskih slotova za pojedinačne zahteve. Takođe, moguće je definisanje zahteva od strane korisnika uvozom .csv dokumenta pri čemu se za svaki zahtev definiše izvorni i odredišni čvor i broj frekvencijskih slotova.

- Implementacija BF, FF i RF algoritama za alokaciju propusnog opsega.
- Određivanje broja ispunjenih zahteva i ukupnog broja frekvencijskih slotova koji je korišćen za ispunjenje zahteva.
- Određivanje broja neispunjenih zahteva i verovatnoće blokiranja zahteva.
- Određivanje vremena potrebnog za alokaciju propusnog opsega.
- Upis dobijenih rezultata u .csv dokument.

4. Rezultati i analiza rezultata

Nakon implementacije modela za alokaciju propusnog opsega izvršeno je testiranje na jednoj manjoj EON dimenzija 7x10, koja je prikazana na Slici 4. Za posmatranu mrežu broj mogućih različitih optičkih konekcija je 21, pri čemu broj alternativnih ruta koje se mogu koristiti za uspostavljanje konekcije iznosi 173. Odnosno, za svaki par čvorova u mreži konekcija se može uspostaviti putem maksimalnih 6 do 13 ruta. Na Slici 4, je za svaku konekciju naznačen maksimalni broj alternativnih ruta, kao i minimalni broj linkova sa uspostavljanje konekcije. Predviđeni broj frekvencijskih slotova za svaki optički link je 64 slota, širine 12.5 GHz. Dakle, ukupan propusni opseg mreže iznosi 0.8 THz, pri čemu je 25% frekvencijskih slotova u svakoj grani zauzeto, odnosno dodeljen je opseg od 0.2 THz, dok je preostalih 0.6 THz dostupno za uspostavljanje novih optičkih konekcija



Slika 4. EON topologija korišćena za testiranje modela

Za potrebe testiranja modela generisano je 80 saobraćajnih zahteva, pri čemu broj zahtevanih frekvencijskih slotova iznosi 160, odnosno 0.2 THz. Dakle, ukupni zahtevani propusni opseg iznosi 0.4 THz, što predstavlja 50% propusnog opsega mreže. Prilikom generisanja saobraćajnih zahteva uvedene su sledeće pretpostavke:

- Opterećenja pojedinačnih linkova se međusobno razlikuju.
- 75% generisanih saobraćajnih zahteva je jednako raspoređeno između linkova 1-4, 1-7, 2-4, 3-5, 4-6, i 6-7. Za svaki navedeni link generisano je po 10 zahteva, a ukupan broj zahtevanih frekvencijih slotova po linku je 20.
- 25% generisanih saobraćajnih zahteva dodeljeno je preostalim linkovima u mreži. Za svaki link generisano je do 2 zahteva, tako da se ukupan broj zahtevanih slotova po linku nalazi u opsegu od 1 do 5.
- Zahtevani broj slotova pojedinačnih zahteva nalazi se u opsegu od 1 do 3.

Radi testiranja modela kreirana su 3 saobraćajna toka, generisanjem novog početnog stanja zauzeća frekvencijskih slotova. Kod svih saobraćajnih tokova korišćeni

su isti zahtevi, ali je redosled zahteva izmenjen. Kako se kod svih implementiranih algoritama za alokaciju propusnog opsega saobraćajni zahtevi obrađuju redosledom kojim su pristigni, redosled saobraćajnih zahteva utiče na postupak dodele frekvencijskih slotova. Uzimajući u obzir ukupno opterećenje mreže, testiranje je izvršeno korišćenjem jedne alternativne rute, odnosno primenom fiksnog rutiranja. Rezultati testiranja prikazani su u Tabeli 1.

Tabela 1. Analiza rezultata BF, FF i RF modela pri zahtevanom propusnom opsegu od 0.4 THz za EON sa Slike 4, korišćenjem fiksnog rutiranja.

Saobraćajni tok	Saobraćajni tok 1			Saobraćajni tok 2			Saobraćajni tok 3		
	BF	FF	RF	BF	FF	RF	BF	FF	RF
Vreme izvršenja [s]	0.52	0.42	0.41	0.45	0.42	0.46	0.46	0.43	0.52
Broj ispunjenih zahteva	80	80	80	79	80	77	80	80	79
Dodeljeni broj slotova	222	222	222	216	222	201	222	222	216
Broj neispunjenih zahteva	0	0	0	1	0	3	0	0	1
Zahtevani broj slotova neispunjenih zahteva	0	0	0	2	0	7	0	0	2

Iz Tabele 1 se može videti da su u slučaju zahtevanog opsega od 0.4 THz, korišćenjem fiksnog rutiranja, najbolji rezultati dobijeni primenom FF algoritma. Primenom FF algoritma postiže se ispunjenje svih saobraćajnih zahteva, pri čemu je dodeljeni broj slotova za ispunjenje zahteva optimalan i iznosi 222 slota. U slučaju BF algoritma optimalno rešenje nije pronađeno za saobraćajni tok 2, gde dolazi do odbijanja jednog zahteva, dok je u slučaju RF algoritma optimalno rešenje dobijeno jedino za saobraćajni tok 1. Kako je postupak dodele frekvencijskih slotova kod RF metode slučajan, za razliku od BF i FF metode, moguće je dobiti i drugačije rezultate u odnosu na rezultate koji su prikazani u Tabelu 1. Alokacija propusnog opsega primenom RF metode za saobraćajni tok 1 je izvršena 10 puta, pri čemu je optimalno rešenje dobijeno 4 puta. Usled malog broja saobraćajnih zahteva nije zabeležena značajna razlika u prosečnom utrošenom vremenu za ispunjenje saobraćajnih zahteva.

Radi daljeg testiranja i poređenja kreiranih modela, ukupan zahtevani propusni opseg je povećan na 0.6 THz, dupliranjem generisanih saobraćajnih zahteva. Odnosno, generisano je 160 saobraćajnih zahteva pri čemu ukupan zahtevani propusni opseg iznosi 0.4 THz, dok je 0.2 THz propusnog opsega već dodeljeno. Pri zahtevanom propusnom opsegu od 0.6 THz korišćen je maksimalni broj alternativnih ruta za sve konekcije u mreži. Dobijeni rezultati prikazani su u Tabeli 2.

Tabela 2. Analiza rezultata pri zahtevanom propusnom opsegu od 0.6 THz za EON sa Slike 4, korišćenjem maksimalnog broja alternativnih ruta.

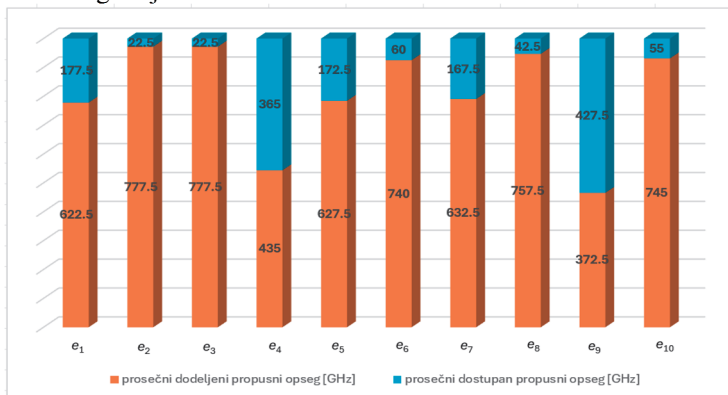
Saobraćajni tok	Saobraćajni tok 1			Saobraćajni tok 2			Saobraćajni tok 3		
	BF	FF	RF	BF	FF	RF	BF	FF	RF
Vreme izvršenja [s]	1.45	1.31	1.37	1.46	1.19	1.05	1.53	1.20	1.13
Broj ispunjenih zahteva	149	147	148	151	146	145	152	148	146
Dodeljeni broj slotova	404	399	383	392	402	389	403	397	386
Broj neispunjenih zahteva	11	13	23	9	14	22	8	12	25
Zahtevani broj slotova neispunjenih zahteva	26	34	57	24	35	54	17	31	59

U slučaju povećanog saobraćajnog obima, kao i povećanja broja alternativnih ruta može se uočiti značajna razlika dobijenih rezultata u odnosu na opterećenje od 0.4 THz. Najveća verovatnoća blokiranja zahteva dobijena je primenom RF algoritma, kao i u slučaju nižeg mrežnog opterećenja. Takođe, može se uočiti neefikasnost prilikom dodele frekvencijskih slotova, posebno kod saobraćajnog toka 2 i 3. U slučaju saobraćajnog toka 2, iskorišćen je skoro isti propusni opseg za ispunjenje saobraćajnih zahteva, u slučaju BF i RF metode, pri čemu su primenom RF metode odbijeni zahtevi od skoro 400 GHz više u poređenju sa BF metodom. Najveća razlika, može se uočiti između BF i FF metode. U slučaju nižeg saobraćajnog opterećenja, primenom fiksnog rutiranja, najbolji rezultati dobijeni su primenom FF algoritma. Suprotno tome, sa povećanjem saobraćajnog opterećenja i primenom alternativnog rutiranja znatno bolji rezultati dobijeni su primenom BF algoritma. Po saobraćajnom toku, primenom BF metode, prosečno se zadovolje zahtevi čiji je zahtevani propusni opseg 137.5 GHz viši u odnosu na FF metodu, a da se pri tome koristi 42.5 GHz manje prilikom alokacije propusnog opsega. Dobijeni rezultati potvrđuju tvrdnju iz [4], da u slučaju višestrukih alternativnih ruta BF algoritam ima bolje performanse u odnosu na FF, dok su u slučaju jedne alternativne rute performanse BF i FF algoritma slične. Prosečno vreme potrebno za alokaciju propusnog opsega u slučaju BF algoritma je više u poređenju sa FF algoritmom i iznosi 1.48 s, dok u slučaju FF algoritma iznosi 1.23 s.

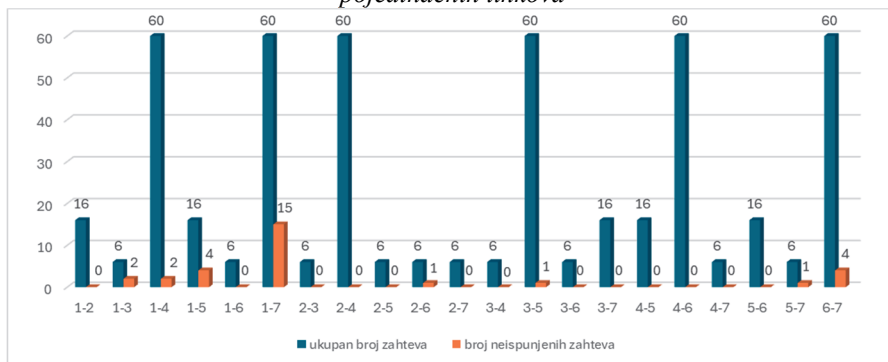
Kako su najbolji rezultati dobijeni primenom BF algoritma izvršena je detaljna analiza dobijenih rezultata za sve saobraćajne tokove radi određivanja optimalnog broja alternativnih ruta. Kreirani model za svaki ispunjeni saobraćajni zahtev beleži putanju i indekse dodeljenih slotova koji se koriste za uspostavljanje optičke konekcije. Takođe, nakon svakog ispunjenog zahteva vrše se izmene nizova s_i , odnosno matrice S , što omogućava uvid u aktuelno opterećenje mreže. Na Slici 5 dat je prikaz prosečnog dodeljenog propusnog opsega, kao i preostalog propusnog opsega za sve linkove u mreži, dok je na Slici 6 dat prikaz ukupnog broja zahteva i broja neispunjenih zahteva pojedinačnih linkova.

Sa Slike 5 se može uočiti, da su nakon obrade svih saobraćajnih zahteva, linkovi e_4 i e_9 najmanje opterećeni u mreži. Ukupno je dostupno skoro 800 GHz u okviru linkova e_4 i e_9 , koji se mogu iskoristiti za uspostavljanje konekcija 4-5 i 5-6, a mogu se koristiti i za uspostavljanje alternativne rute 4-6, uzimajući u obzir zauzeće linka e_8 . Kao što se može videti sa Slike 6, u slučaju konekcija 4-5 i 5-6 ne dolazi do odbijanja zahteva, kao ni u slučaju konekcije 4-6 koja predstavlja jednu od konekcija sa najvećim brojem saobraćajnih zahteva u mreži. U okviru linkova e_1 , e_5 i e_7 dostupno je oko 170 GHz za uspostavljanje novih konekcija, dok su preostali linkovi u mreži skoro maksimalno opterećeni. Najveći broj zahteva blokiran je u slučaju konekcije 1-7. Link 1-7 je jedan od najopterećenijih linkova u mreži, ali je broj neispunjenih zahteva znatno viši u poređenju sa ostalim linkovima koji imaju isti broj zahteva, kao i isti zahtevani propusni opseg. Kao što se može videti sa Slike 4, za uspostavljanje konekcije 1-7 potrebno je minimalno 3 linka, dok je za uspostavljanje svih ostalih konekcija u mreži potrebno minimum 1 ili 2 linka. Obzirom na minimalni broj linkova za uspostavljanje konekcije i zahtevani propusni opseg, broj neispunjenih saobraćajnih zahteva je očekivan. Potrebno je napomenuti da je nakon analize pojedinih saobraćajnih tokova uočeno da se u slučaju konekcije 1-7 retko koristi druga alternativna ruta 1-4-6-7, koja takođe obuhvata 3 linka, e_2 , e_8 i e_{10} , kao i primarna ruta 1-2-3-7. Skoro svi slotovi linkova e_2 , e_8 i e_{10} su zauzeti, tako da se u slučaju konekcije 1-7 češće koriste alternativne rute 1-4-5-6-7 i 1-2-3-5-6-7,

koje podrazumevaju korišćenje većeg broja linkova za uspostavljanje konekcije, a samim tim i upotrebu većeg broja slotova.



Slika 5. Pregled prosečnog dodeljenog i preostalog dostupnog propusnog opsega pojedinačnih linkova



Slika 6. Pregled ukupnog broja zahteva i broja neispunjenih zahteva pojedinačnih linkova za sve saobraćajne tokove

Nakon analize svih saobraćajnih tokova određen je optimalan broj alternativnih ruta za svaki par čvorova u mreži u cilju smanjenja vremena potrebnog za alokaciju propusnog opsega. Pregled optimalnog broja alternativnih ruta dat je u Tabeli 3. Bez obzira na visok broj alternativnih ruta, prilikom dodele frekvencijskih slotova za većinu konekcija optimalno je koristiti 1 ili 2 rute. Iz Tabele 3 se može videti da je optimalno koristiti samo jednu alternativnu rutu za čak 11 konekcija u mreži. Čak i u slučaju konekcija 2-4, 3-5 i 6-7, kojima je upućen najveći broj zahteva, optimalno je koristiti 1 alternativnu rutu. Povećanje broja alternativnih ruta ne dovodi uvek do smanjenja broja neispunjenih zahteva niti boljeg iskorišćenja dostupnog propusnog opsega. Optimalan broj alternativnih ruta zavisi od dimenzija mreže, saobraćajnog opterećenja i ukupnog dostupnog propusnog opsega mreže. Iz Tabele 3 se može videti da je u slučaju konekcija 1-3, 1-5, 1-7 i 2-6 predviđeno korišćenje većeg broja alternativnih ruta. Prilikom određivanja alternativnih ruta vrši se sortiranje ruta u rastućem poretku na osnovu broja linkova potrebnih za uspostavljanje konekcije. Kod pojedinih alternativnih ruta postoji više opcija za uspostavljanje konekcije između izvornog i odredišnog čvora sa istim

brojem linkova. U tim slučajevima nije definisan redosled sortiranja ruta po nekom drugom kriterijumu. Npr. u slučaju konekcije 1-3 za uspostavljanje druge i treće alternativne rute, 1-4-2-3 i 1-4-5-3, koriste se tri linka. Analizom rezultata uočeno je da se druga alternativna ruta 1-4-2-3 nikada ne koristi, dok se kod pojedinih zahteva koristi treća alternativna ruta 1-4-5-3. Dakle, u slučaju konekcije 1-3, kao i konekcije 1-5, zapravo se koriste dve alternativne rute, ali je zbog načina sortiranja alternativnih ruta neophodno predvideti korišćenje tri rute. Takođe, zbog sortiranja alternativnih ruta, i u slučaju konekcija 1-7 i 2-6, gde je predviđeno korišćenje 6, odnosno 4 alternativne rute, zapravo se koristi manji broj ruta, 4 odnosno 3 rute.

Tabela 3. Pregled optimalnog broja alternativnih ruta za EON sa Slike 4.

Ruta	Optimalni broj alternativnih ruta	Ruta	Optimalni broj alternativnih ruta	Ruta	Optimalni broj alternativnih ruta
1 – 2	1	2 – 4	1	3 – 7	1
1 – 3	3	2 – 5	1	4 – 5	1
1 – 4	2	2 – 6	4	4 – 6	2
1 – 5	3	2 – 7	1	4 – 7	2
1 – 6	2	3 – 4	2	5 – 6	1
1 – 7	6	3 – 5	1	5 – 7	2
2 – 3	1	3 – 6	1	6 – 7	1

Nakon određivanja optimalnog broja ruta ponovo je testiran BF model za sve saobraćajne tokove pri opterećenju od 0.6 THz. Korišćenjem dobijenog broja optimalnih ruti prosečno vreme izvršenja smanjuje se sa 1.48 s na 0.94 s, što je niže i u poređenju sa FF i RF metodom. Pri tome, smanjenje broja alternativnih ruta ne utiče na druge performanse BF algoritma. Ukoliko bi se kao u drugim istraživanjima koristio isti broj alternativnih ruta za sve konekcije u mreži, npr. 5 alternativnih ruta, prosečno vreme potrebno za dodelu propusnog opsega iznosilo bi 1.21 s, što je za 0.27 s više u poređenju sa pristupom kada je korišćen optimalni broj alternativnih ruta. Takođe, u slučaju korišćenja 5 alternativnih ruta dolazi do povećanja broja blokiranih zahteva.

5. Zaključak

U okviru rada implementirani su FF, BF i RF modeli za rešavanje problema alokacije propusnog opsega u okviru EON. Izvršeno je poređenje performansi modela u statičkom režimu rada pri različitim saobraćajnim opterećenjima korišćenjem fiksnog i alternativnog rutiranja. Primenom fiksnog rutiranja, pri manjem saobraćajnom opterećenju, najbolji rezultati dobijeni su primenom FF modela, pri čemu BF model ima malo lošije performanse. Sa druge strane, u slučaju povećanog saobraćajnog obima i višestrukih alternativnih ruta BF model ima znatno bolje performanse u odnosu na FF model. Kreirani modeli pored poređenja performansi omogućavaju i detaljnu analizu saobraćaja, kao i određivanje optimalnog broja alternativnih ruta što dovodi do značajnog smanjenja vremena potrebnog za dodelu propusnog opsega u slučaju BF metode.

Prilikom analize rezultata uočeno je nekoliko potencijalnih opcija za modifikaciju BF modela koje obuhvataju sortiranje saobraćajnih zahteva prema zahtevanom propusnom opsegu. Predikcija saobraćaja, kombinacija alternativnog i iscrpljujućeg rutiranja, takođe može rezultovati efikasnijom upotrebom raspoloživih mrežnih resursa.

Literatura

- [1] ITU-T Recommendation G.694.1: "Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid", ITU-T Geneva, 2004.
- [2] ITU-T Recommendation G.694.1: "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid", ITU-T Geneva, 2012.
- [3] G. Marković, S. Miladić-Tešić, "Tehnika agregacije saobraćaja i dimenzionisanje resursa elastičnih optičkih mreža", *XXXVII Simpozijum o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju-PosTel*, Beograd, decembar 2019.
- [4] L. Ruiz et al., "Routing, modulation and spectrum assignment algorithm using multi-path routing and best-fit", *IEEE Access*, 9, 111633-111650, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3101998.
- [5] J. Zhang, F. Qian and J. Yang, "Online routing and spectrum allocation in elastic optical networks based on dueling Deep Q-network", *Computers & Industrial Engineering*, 173, 108663, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108663>.
- [6] F. S. Abkenar, A. G. Rahbar and A. Ebrahimzadeh, A., "Best fit (BF): A new spectrum allocation mechanism in elastic optical networks (EONs) ", *8th International Symposium on Telecommunications (IST)*, IEEE, pp. 24-29. 2016. DOI: 10.1109/ISTEL.2016.7881775.
- [7] S. Miladić, G. Marković, "Elastične optičke mreže", *XXXIII Simpozijum o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju-PosTel*, 241-251, Beograd, decembar 2015.
- [8] G. Z. Marković, "Routing and spectrum allocation in elastic optical networks using bee colony optimization", *Photonic Network Communications*, 34(3), 356-374, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11107-017-0706-z>.

Abstract: *In order to make the most efficient use of available network resources and overcome problems such as fixed channel width and maximum transmission speed in optical telecommunications, the concept of elastic optical networks is introduced. One of the main obstacles to the implementation of elastic optical networks is the routing and spectrum allocation problem. This paper covered several commonly used techniques for spectrum allocation in static mode under various traffic levels. We have implemented three models using several frequency slot allocation techniques. In addition to performance comparisons, the developed models also allow comprehensive traffic analysis, providing an overview of used alternate routes and network link load. We explain in detail the method for determining the optimal number of alternate routes in multipath routing, using a given network topology example. Determining the optimal number of routes for each connection in the network allows for a significant reduction in the time required for spectrum allocation without compromising the other model's performance.*

Keywords: *elastic optical networks, routing, spectrum allocation, optimization*

IMPLEMENTATION OF MODELS FOR ROUTING AND SPECTRUM ALLOCATION IN ELASTIC OPTICAL NETWORKS

Goran Marković, Ivana Stefanović and Snežana Mladenović