

TEHNIKA AGREGACIJE SAOBRAĆAJA I DIMENZIONISANJE RESURSA ELASTIČNIH OPTIČKIH MREŽA

Goran Marković¹, Suzana Miladić-Tešić^{1,2}

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

²Univerzitet u Istočnom Sarajevu – Saobraćajni fakultet, suzana.miladictesic@sf.ues.rs.ba

Sadržaj: *Elastične optičke mreže predstavljaju buduće tehnološko rešenje za efikasno korišćenje optičkih mrežnih resursa, obzirom da fiksni razmak između talasnih dužina, kojim veliki deo raspoloživog opsega ostaje neiskorišćen predstavlja nedostatak tradicionalne DWDM tehnologije. Važno pitanje koje se nameće prilikom projektovanja optičkih mreža odnosi se na proceduru agregacije saobraćaja, kao jedne od tehnika saobraćajnog inženjeringa za optimizaciju korišćenja resursa mreže. U radu su predstavljeni koncept i efekti primene agregacije saobraćaja u elastičnim optičkim mrežama, kao i neophodni uslovi za hardversku realizaciju. Analiziran je problem optičke agregacije kao ekstenzija osnovnog problema rutiranja i alokacije spektra u mrežama sa statičkim saobraćajnim zahtevima. Efekti primene tehnike optičke agregacije i rezultati u pogledu ostvarenih ušteda resursa mreže, u pogledu potrebnog broja frekvencijskih slotova i optičkih predajnika ilustrativani su na primeru optičke mreže manjih dimenzija.*

Ključne reči: *elastične optičke mreže, optička agregacija, resursi mreže*

1. Uvod

Savremene telekomunikacione mreže otvaraju put za širok spektar novih usluga i aplikacija koje menjaju i unapređuju svakodnevni život na mnogo načina. To zahteva obradu sve veće količine podataka, kao i unapređene performanse uređaja koji će omogućiti obradu tih podataka. Sa aspekta korisnika usluga, zahteva se koncept „on demand“, odnosno isporuka i naplata servisa zasnovana na stvarnim potrebama. U skladu sa tim, i telekomunikaciona mreža mora da se prilagođava novim tehnologijama i rešenjima, što podrazumeva njenu nadgradnju ili potpunu promenu arhitekture. Sa ekonomske strane i sa aspekta prethodnih investicija, prihvatljivija je solucija da nadgradnja bude parcijalnog karaktera, odnosno u onim delovima mreže u kojima su prisutna najveća saobraćajna opterećenja. Prenos velikog agregatnog saobraćaja u optičkim transportnim mrežama trenutno je podržan DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) tehnologijom, koja je zasnovana na korišćenju proširenog spektra talasnih dužina i fiksnom razmaku između njih od 50 ili 100 GHz. Međutim, povećani obim saobraćaja u transportnim mrežama dovodi do dostizanja granice fizičkog kapaciteta optičkog vlakna, a racionalna upotreba ovog resursa već odavno je postala imperativ.

Ukoliko bi se koristila adaptivna (*flex-grid*) oprema u čvorovima mreže, koja bi svoje parametre prilagođavala individualnim saobraćajnim zahtevima i aktualnim transmisionim uslovima, mogla bi se postići maksimizacija spektralne efikasnosti i povećanje transmisionih kapaciteta. Da bi se bolje iskoristio ograničeni opseg frekvencija u optičkim mrežama, razmak između kanala multipleksiranih po talasnim dužinama mora da se smanji. Zbog toga je ITU-T preporukom G.694.1 [1] standardizovana fleksibilnost DWDM optičkih mreža i definisan koncept frekvencijskog slota (FS, *Frequency Slot*) sa širinom od 12.5 ili 6.25 GHz, koji predstavlja najmanji opseg učestanosti optičkog kanala. Na taj način omogućena je veća fleksibilnost u dodeli propusnog opsega putevima svetlosti. *Flex-grid* ili kako se još nazivaju elastične optičke mreže (EON, *Elastic Optical Networks*), poslednjih par godina postaju predmet značajnog interesovanja šire istraživačke zajednice.

Racionalnija upotreba resursa mreže moguća je uz primenu odgovarajućih tehnika mrežnog i saobraćajnog inženjeringa. Za razliku od tehnika inženjeringa mreža, koja za cilj ima proširenjem režnih resursa (linkovi, ruteri, multiplekseri, konvertori i sl.) u cilju opsluživanja očekivanih saobraćajnih zahteva, inženjering saobraćaja ima za cilj optimizaciju korišćenja postojećih mrežnih resursa, što se postiže promenom postojećih saobraćajnih tokova u mreži, radi izbegavanja prevelikog opterećenja mreže ili zadovoljenja novih ili povećanih zahteva korisnika. Važno pitanje koje se nameće prilikom projektovanja optičkih mreža jeste i mogućnost primene agregacije saobraćaja, kao jedne od tehnika saobraćajnog inženjeringa. Pronalazak raspoložive fizičke rute između para čvorova i dodela odgovarajućih frekvencijskih slotova u okolini centralne frekvencije zajedno sa rešavanjem problema agregacije saobraćaja je od ključnog značaja za unapređenje efikasnosti i sveukupnih performansi elastičnih optičkih mreža.

Agregacijom saobraćaja moguće je optičke konekcije sa zajedničkim izvornim čvorom (koje generiše isti optički predajnik) grupisati u isti optički tunel. Na taj način se povećava iskorišćenost samog predajnika i smanjuje njihov ukupan potreban broj u mreži, a sa aspekta spektralne iskorišćenosti minimizira se upotreba optičkog spektra eliminisanjem zaštitnih opsega (GB, *Guard Bands*) između grupisanih konekcija unutar optičkog tunela. Primenom tehnike agregacije direktno na optičkom nivou, izbegava se i O/E/O (*Optical/Electrical/Optical*) konverzija signala u čvorovima mreže, odnosno sa IP sloja se na optički sloj prebacuju one konekcije koje imaju isti izvorni čvor. Manji broj predajnika i O/E/O konverzija utiče i na veću energetska efikasnost, tako da su prednosti primene tehnike agregacije saobraćaja višestruke. Obzirom da je fokus rada dimenzionisanje resursa mreže, analizira se statički saobraćajni scenario, odnosno tehnika agregacije saobraćaja u *off-line* režimu.

Cilj rada je da ukaže na ključne aspekte koji se odnose na primenu tehnike agregacije saobraćaja u elastičnim optičkim mrežama. Kroz naredne sekcije rada prikazani su efekti primene tehnike, hardverski uslovi za realizaciju, osnovna ograničenja, kao i ilustracija koncepta agregacije saobraćaja i dimenzionisanja resursa na primeru manje optičke mreže.

2. Efekti primene tehnike agregacije saobraćaja

Nekoliko tehnika saobraćajnog inženjeringa kojima je moguće poboljšati spektralnu efikasnost u EON mrežama prikazane su u [2]. Agregacija saobraćaja je jedna od potencijalnih tehnika omogućena implementacijom OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) postupka multipleksiranja, gde se celokupan optički spektar deli na

ortogonalne pod-nosioce, odnosno frekvencijske slotove. U tradicionalnim WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) optičkim mrežama agregacija saobraćaja podrazumeva multipleksiranje manjih saobraćajnih zahteva u puteve svetlosti većeg kapaciteta radi bolje iskorišćenosti raspoloživog propusnog opsega talasne dužine. Na taj način postizala se veća propusnost mreže i smanjenje troškova, optimizacijom potrebnog broja ADM (*Add/Drop Multiplexer*) multipleksera. U čvorovima mreže grupisani su električni signali, zatim je vršena njihova konverzija u optički signal, što je rezultovalo većim kašnjenjem i degradacijom kvaliteta prenošenog signala. ADM multiplekser je u svakom čvoru mreže bio rezervisan za samo jednu talasnu dužinu. Opisani postupak je u literaturi poznat i kao *e-grooming*, odnosno elektronsko grupisanje/agregacija koje nije ni ekonomično, niti energetski efikasno. U cilju postizanja fleksibilnosti i eliminacije elektronskog multipleksiranja, aktuelna istraživanja u okviru elastičnih optičkih mreža usmerena su ka konceptu optičkog multipleksiranja, poznatog i kao *o-grooming*, gde se zahtevane konekcije grupišu direktno na optičkom sloju, bez potrebe za O/E/O konverzijom u međučvorovima. Tehno-ekonomska evaluacija postupka električne naspram optičke agregacije analizirana je u [3].

Dva najvažnija efekta primene optičke agregacije saobraćaja odnose se na sledeće aspekte: prvi se odnosi na bolje iskorišćenje raspoloživog kapaciteta optičkih predajnika što za posledicu ima minimizaciju njihovog ukupnog potrebnog broja, a drugi na spektralne uštede, odnosno potreban broj frekvencijskih slotova na linkovima u mreži. Kapacitet optičkog predajnika uglavnom je veći od zahtevanog kapaciteta puta svetlosti. Obzirom da se optički predajnik koristi za transmisiju više tipova optičkih konekcija, različitih po veličini, njegov raspoloživi kapacitet se ne koristi na najbolji način, ukoliko se svaka konekcija multipleksira pojedinačno. Agregacijom konekcija moguće je postići efikasnije korišćenje raspoloživog kapaciteta optičkih predajnika, odnosno smanjiti njihov potreban broj u mreži. Spektralna ušteda se postiže smanjenjem broja zaštitnih opsega potrebnih za izbegavanje interferencije i razdvajanje pojedinačnih konekcija. Zbog ortogonalnosti nosilaca, sve konekcije koje imaju isti izvorni čvor grupišu se u jedan optički tunel i između njih tada nisu potrebni zaštitni opsezi. Zaštitni opseg je potreban samo između različitih tunela, odnosno prilikom izdvajanja konekcija u tranzitnim čvorovima, prema različitim odredišnim čvorovima. Koncept optičke agregacije saobraćaja i optičkog tunela analiziran je u nekoliko ranijih studija [4-7] koje su bile polazna osnova za razvoj algoritama koji se bave navedenim problemom. Rezultati istraživanja pokazuju da se grupisanjem konekcija mogu postići spektralne uštede od 5-15% u odnosu na scenario bez primene agregacije [7]. U slučaju iskorišćenosti kapaciteta predajnika pokazano je da se uštede kreću u granicama od 25-60% [7]. U literaturi se mogu sresti i brojna poređenja performansi mreža gde je tehnika agregacije implementirana u okviru analize energetske efikasnosti, defragmentacije spektra, oporavka mreže u slučaju otkaza i dr. [8-11]. Detaljna analiza i klasifikacija algoritama koji se bave problemom optičke agregacije saobraćaja prikazana je u [12].

3. Hardverski uslovi za realizaciju koncepta agregacije saobraćaja

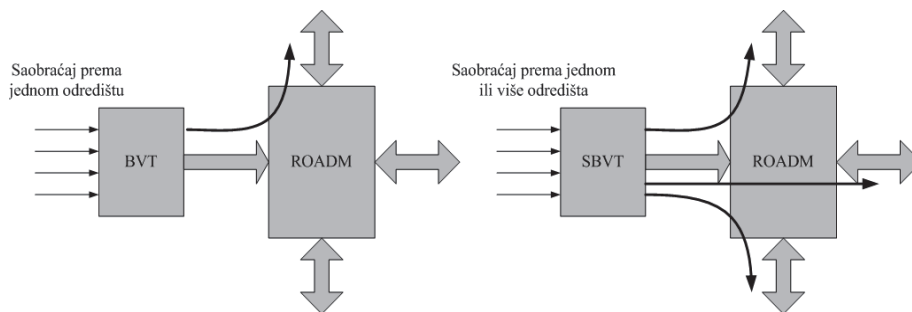
Zamena mrežne opreme koja podržava fiksni grid opremom koja podržava fleksibilni grid predstavlja pitanje trenutka za operatore telekomunikacionih meža. Na odluku o migraciji ka fleksibilnom konceptu mreže uticaće nekoliko ključnih faktora, kao što su: kompromis između očekivanih benefita i ukupnih troškova instalacije nove opreme,

kompatibilnost sa postojećim sistemima, složenost upravljanja mrežom i dr. Implementacija fleksibilnosti neće biti moguća odmah na nivou cele mreže. Trenutna mreža sa fiksnim gridom mora biti maksimalno operativna u toku procesa migracije da bi se isplatila prethodna investiranja odnosno da se u potpunosti iskoriste postojeći kapaciteti optičkih transportnih mreža.

Arhitektura elastične optičke mreže podrazumeva primenu specifičnih hardverskih komponenata [13-15]:

- optičkih kros-konektora promenljivog kapaciteta (BV-OXC, *Bandwidth Variable- Optical Cross-Connect*) koji se koriste za rutiranje elastičnih optičkih konekcija od predajnika do prijemnika,
- rekonfigurabilnih optičkih *add/drop* multipleksera (ROADM, *Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers*) koji se koriste za dinamičko izdvajanje ili prosleđivanje signala, bez O/E/O konverzije u čvorovima, i
- adaptivnih optičkih predajnika i prijemnika (BVT, *Bandwidth Variable Transponder*) koji se softverski prilagođavaju protoku, tipu modulacije i centralnoj frekvenciji dolaznog signala.

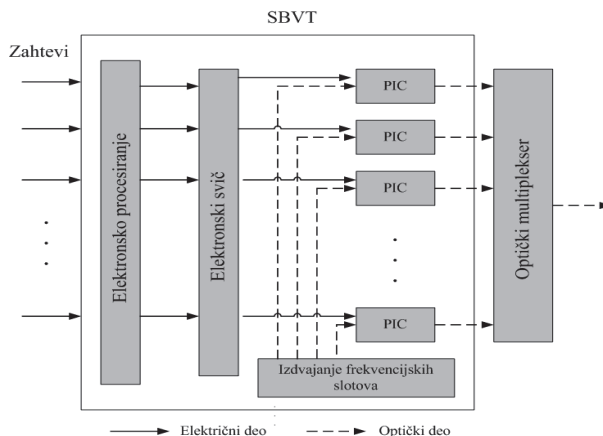
BVT podržavaju prenos velikim brzinama primenom spektralno efikasnih tehnika modulacije, kao što su 16-QAM (16- *Quadrature Amplitude Modulation*) ili 64-QAM za kraće puteve svetlosti. Kada su u pitanju duži putevi svetlosti koriste se manje efikasne, ali robusnije tehnike modulacije, poput QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) ili BPSK (*Binary Phase Shift Keying*). Prema tome, BVT kompromisno rešavaju probleme spektralne efikasnosti i prenosa na različitim distancama. Međutim, kada BVT radi na nižoj od maksimalne brzine prenosa, zbog karakteristika zahtevanog puta svetlosti, deo njegovog kapaciteta nije iskorišćen. Zbog toga je predložen SBVT (*Sliceable Bandwidth Variable Transponder*) [13], [16] kako bi se elastičnost maksimalno iskoristila i omogućila agregacija saobraćaja na optičkom nivou. SBVT predstavlja unapređenu verziju BVT i ima sposobnost da dodeljuje kapacitet jednoj ili više optičkih konekcija koje se prenose na jedno ili više odredišta za razliku od BVT koji šalje samo na jedno odredište. Kada SBVT generiše optičku konekciju manjeg intenziteta, njegovi slobodni kapaciteti se mogu koristiti za prenos drugih konekcija koje se mogu grupisati ili razdvajati. Na Slici 1. prikazana je razlika između BVT i SBVT.



Slika 1. Funkcionalnost BVT i SBVT [13]

Na Slici 2 prikazana je arhitektura SBVT koju čine: izvor koji vrši predaju frekvencijskih slotova sa jednakim razmakom, modul za elektronsko procesiranje,

elektronski komutator, integrisano optičko kolo (PIC, *Photonic Integrated Circuit*) i rekonfigurabilni optički multiplekser (*ROADM*). Izvor koji radi na više talasnih dužina vrši predaju nosilaca ili slotova, a moguće ga je zameniti sa više lasera, po jedan za svaki slot. Svaki zahtev se elektronski procesira, a zatim se dalje rutira prema određenom optičkom kolu, nakon čega se vrši izdvajanje slotova. Svaki PIC se koristi kao predajnik i podržava različite vrste modulacije. Agregacija se vrši u optičkom multiplekseru, gde se može formirati super-kanal.



Slika 2. Arhitektura SBVT[13]

4. Problem optičke agregacije saobraćaja i osnovna ograničenja

Problem agregacije saobraćaja u EON mrežama predstavlja proširenu verziju RSA (*Routing and Spectrum Allocation*) problema. Rešavanje RSA problema je sastavni deo prilikom rešavanja velikog broja problema u EON mrežama. Zbog toga je izbor pogodnog RSA algoritma od suštinskog značaja za unapređenje performansi i upravljanje resursima mreže. Problem optičke agregacije u slučaju statičkog saobraćaja može se formulisati na sledeći način: za datu fizičku topologiju mreže i poznatu matricu saobraćajnih zahteva (gde je saobraćajni zahtev između para čvorova predstavljen potrebnim brojem frekvencijskih slotova) pri datom skupu ograničenja, potrebno je minimizirati potrebne resurse mreže, kao što su ukupan zauzeti spektar ili ukupan broj optičkih predajnika, grupisanjem konekcija u optičke tunele, čiji kapacitet ne može biti veći od raspoloživog kapaciteta optičkog predajnika.

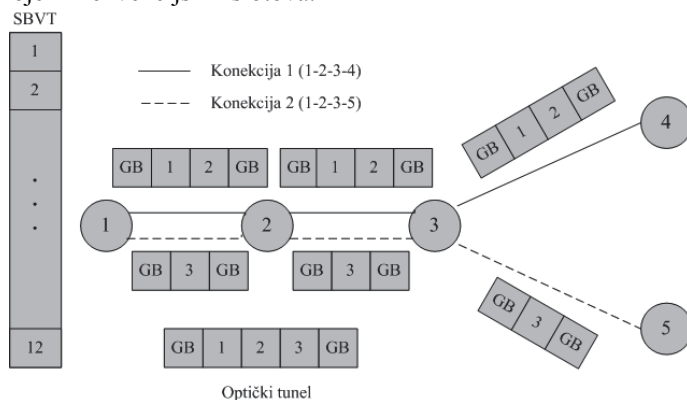
4.1. Osnovna ograničenja

Prilikom rešavanja problema optičke agregacije saobraćaja, pored inherentnih RSA ograničenja kontinuiteta i susedstva frekvencijskih slotova, moraju se uzeti u obzir i ograničenja koja se odnose na raspoložive kapacitete i funkcionalnost optičkih predajnika, što problem čini značajno složenijim. Shodno navedenom, ograničenja koja figurišu u problemu optičke agregacije saobraćaja su sledeća:

- ograničenje susedstva frekvencijskih slotova,
- ograničenje kontinuiteta frekvencijskih slotova,

- ograničenje raspoloživog kapaciteta i spektralnog opsega predajnika, definisanog početnom i krajnjom frekvencijom optičkog tunela, što limitira broj grupisanih konekcija.

Ograničenje susedstva odnosi se na neophodnost rezervisanja susednih frekvencijskih slotova koji će biti korišćeni za uspostavljanje puta svetlosti od izvornog do odredišnog čvora. Susedni frekvencijski slotovi moraju dodatno, u mrežama bez mogućnosti konverzije spektra, ispunjavati i ograničenje kontinuiteta, što podrazumeva alokaciju istih frekvencijskih slotova za datu konekciju na svim linkovima duž rute od izvornog do odredišnog čvora. Kada je u pitanju ograničenje koje se odnosi na optički predajnik, posmatra se spektralni opseg i ukupan kapacitet predajnika, takođe izražen određenim brojem frekvencijskih slotova.



Slika 3. Ilustracija koncepta agregacije optičkih konekcija

4.2. Ilustracija koncepta agregacije optičkih konekcija

Na primeru sa slike 3 ilustrovane su uštede koje je moguće ostvariti ukoliko se primeni tehnika agregacije saobraćaja. Uštede se odnose na broj zauzetih frekvencijskih slotova i predajnika potrebnih za uspostavljanje konekcija 1 i 2. Za konekciju 1, koja se uspostavlja između para čvorova (1,4) duž rute 1-2-3-4, pretpostavljeno je da je zahtevani broj slotova 2, odnosno 4 (uzimajući u obzir i zaštitni opseg sa svake strane) po svakom fizičkom linku, pa je ukupan potreban spekter u mreži za ovu konekciju 12 frekvencijskih slotova. Za konekciju 2, koja se uspostavlja između para čvorova (1,5) duž rute 1-2-3-5, koja zahteva 1 frekvencijski slot, potreban broj slotova na svakom linku je 3, odnosno ukupno 9 slotova duž cele rute. Obzirom da obe konekcije imaju zajednički izvorni čvor 1, zatim linkove (1-2) i (2-3), moguće ih je grupisati u optički tunel. Grupisanje je moguće na zajedničkom delu rute, koji čine linkovi (1-2) i (2-3). Agregacijom konekcija u optički tunel eliminišu se 4 frekvencijska slotova koja bi bila zauzeta na linkovima zbog potrebe korišćenja zaštitnih opsega. Kako je pretpostavljeni kapacitet predajnika 12 slotova, a veličina tunela 5 slotova, u čvoru 1 je dovoljno upotrebiti samo jedan optički predajnik za multipleksiranje. Time se ostvaruje ušteda od jednog optičkog predajnika. Posmatrane konekcije se razdvajaju u čvoru 3, svaka prema različitom odredištu, gde se svakoj ponovo dodeljuju zaštitni opsezi. U Tabeli 1 prikazan je rezultat za potreban broj frekvencijskih

slotova i broj optičkih predajnika za uspostavljanje konekcija 1 i 2, u slučaju sa i bez agregacije konekcija u izvornom čvoru 1.

Tabela 1. Potrebni resursi mreže bez i sa agregacijom optičkih konekcija

Optička konekcija	Zahtevani kapacitet	Bez agregacije	Sa agregacijom
1 (1-2-3-4)	2 FS + 2 GB	21 slot	17 slotova
2 (1-2-3-5)	1 FS + 2 GB	2 predajnika	1 predajnik

4.3. Rešavanje *off-line* problema optičke agregacije

U okviru istraživanja problema optičke agregacije u EON mrežama u literaturi je predloženo nekoliko matematičkih (ILP) formulacija, kao i heurističkih algoritama u slučaju statičkog saobraćajnog scenarija [7,17,18]. Pokazano je da je određivanje optimalnog rešenja NP-težak problem i da se egzaktne metode mogu primeniti jedino u slučaju male kompleksnosti problema.

Jedna od predloženih ILP formulacija za rešavanje *off-line* problema optičke agregacije, kojom se minimizira ukupan broj frekvencijskih slotova ili broj optičkih predajnika potrebnih za uspostavljanje svih zahtevanih konekcija predstavljena je u [7]. Predložena formulacija obuhvata samo osnovni problem agregacije i inherentni RSA problem, bez dodatnih ograničenja koja se odnose na pitanja energetske efikasnosti, fragmentacije spektra i sl. Kriterijumska funkcija ILP optimizacionog zadatka formulisana je u sledećem obliku [7]:

$$\min C_{total} \text{ ili } \min T_{total} \quad (1)$$

gde je:

$$C_{total} = \sum_l C_l, \forall l \in L \quad (2)$$

$$C_l \geq f_{sd} + \Lambda_{sd} + 2g - 1 - W \times (1 - x_{sdi}), \forall (s, d), l \quad (3)$$

$$T_{total} = \sum_{s,d} T_{sd} \quad (4)$$

pri čemu prethodno navedene notacije imaju sledeća značenja:

C_{total} - suma indeksa najvećih zauzetih frekvencijskih slotova na svim linkovima mreže,

C_l - indeks najvećeg zauzetog frekvencijskog slotova na linku l , $l \in L$

L - ukupan broj linkova u mreži,

T_{total} - ukupan broj predajnika potrebnih za uspostavljanje svih zahtevanih konekcija,

Λ_{sd} - matrica saobraćajnih zahteva za (s, d) parove čvorova,

W - ukupan kapacitet svih zahtevanih konekcija u mreži, $W = \sum_{s,d} \Lambda_{sd}$

g - potreban zaštitni opseg,

binarne promenljive:

x_{sdi} - odnose se na korišćenje rute i za konekciju između para čvorova (s, d) ,

$G_{sdi}^{sd, sd'}$ - odnose se na upotrebu rute i od strane konekcija (s, d) i (s', d') koje su grupisane u isti optički tunel;

$\rho^{sd, s'd'}$ - odnose se na indekse početnih slotova grupisanih konekcija (s, d) i (s', d') ;

$M_{sd, sd'}$ - odnose se na korišćenje zajedničkog optičkog predajnika od strane grupisanih konekcija (s, d) i (s', d') ;

T_{sd} - odnose se na korišćenje zasebnog predajnika za konekciju (s, d) ,

celobrojne promenljive:

- f_{sd} - početni slot konekcije (s,d),
 F_{sd} - početni slot tunela koji sadrži konekciju (s,d).

U datoj formulaciji figuriše širok set ograničenja vezanih za rutiranje konekcija, spektralna ne-preklapanja konekcija, agregaciju konekcija sa istim izvornim čvorom, relacije između korišćenih frekvencijskih slotova optičkih tunela i grupisanih konekcija, kao i ograničenja vezana za upotrebu raspoloživih kapaciteta optičkih predajnika. Rezultati rešavanja ILP formulacije na primeru manje topologije mreže sa 5 čvorova, pokazuju da se agregacijom konekcija mogu postići značajne uštede u potrebnom broju predajnika (od 15% do 75%), za različite vrednosti granularnosti saobraćaja (broja frekvencijskih slotova) u odnosu na scenario bez agregacije, dok se u pogledu ukupnog potrebnog broja frekvencijskih slotova mogu postići uštede između 4% i 11%, pri čemu se spektralne uštede smanjuju sa porastom granularnosti saobraćaja. U [17] je predložena ILP formulacija problema agregacije (TG, *Traffic Grooming*) i rutiranja po višestrukim rutama (MPR, *Multi-path Routing*), kojom se minimizira indeks najvećeg zauzetog slota, uzimajući u obzir efekte degradacije signala na fizičkom sloju, za različite modulacione formate i brzine prenosa. Rezultati simulacija pokazuju da predloženi model pruža značajno unapređenje performansi u pogledu spektralne efikasnosti u mrežama manjeg stepena povezanosti, sa velikim saobraćajnim zahtevima i linkovima velikih dužina.

Veliki broj promenljivih i ograničenja u ILP formulacijama doprinosi visokoj kompleksnosti njihovog rešavanja, pa je za pronalaženje rešenja u mrežama realnih dimenzija neophodno koristiti heurističke algoritme. U [7] su, pored prethodno opisane ILP formulacije, predložena i dva heuristička algoritma, nazvana LSG (*Least Spectrum Grooming*) i MTG (*Minimum Transmitter Grooming*) i testirana na primerima realnih mreža. LSG algoritam minimizira ukupan zauzeti spektar agregacijom optičkih konekcija koje imaju najdužu zajedničku rutu iz istog izvornog čvora, dok MTG algoritam ima za cilj minimizaciju potrebnog broja optičkih predajnika. U [17] je osim ILP formulacije predložen i heuristički TMG (*Traffic grooming Multipath routing Gaussian noise*) algoritam koji unapređuje spektralnu efikasnost opsluživanjem saobraćajnih zahteva koji se ne mogu rutirati zbog prevelike degradacije signala na fizičkom sloju ili usled nedostatka spektralnih resursa na jednoj putanji koristeći koncept TG i MPR. U [18] je predložen heuristički algoritam za *off-line* agregaciju *multicast* konekcija na optičkom sloju, pod nazivom TG-MRSA (*Traffic Grooming Multicast Routing and Spectrum Assignment*), kojim se grupišu slični *multicast* zahtevi (sa istim izvornim i istim setom odredišnih čvorova), koji se mogu rutirati koršćenjem zajedničkog (najkraćeg) *multicast* stabla. Pokazano je da se primenom pomenutih heurističkih algoritama mogu dobiti rešenja u mrežama realnih dimenzija, koja su po kvalitetu bolja u poređenju sa rešenjima bez primene agregacije ili u poređenju sa drugim heurističkim algoritmima. Međutim, kvalitet rešenja mogao bi se dalje unaprediti primenom sofisticiranijih optimizacionih tehnika, poput različitih meta-heuristika, koje za razliku od heurističkih algoritama pretražuju širok skup dopustivih rešenja tokom procedure pronalaženja najboljeg rešenja.

5. Zaključak

Uvođenje elastičnosti u optički domen predstavlja logičan pravac i nastavak u razvoju optičkih transportnih mreža. U poređenju sa fiksnom dodelom opsega tj. tehnologijom fiksnog grida, fleksibilnost ima mnoštvo prednosti, kao što su bolja spektralna efikasnost, manji potreban broj optičkih predajnika, poboljšana energetska

efikasnost i dr. Svojtvo elastičnosti potrebno je maksimalno iskoristiti primenom odgovarajućih tehnika mrežnog i saobraćajnog inženjeringa. Na taj način moguće je poboljšati performanse mreže i racionalnije koristiti postojeće resurse. U radu su istraživani efekti primene tehnike agregacije saobraćaja, koja pripada grupi tehnika saobraćajnog inženjeringa. Pokazano je kakvi se benefiti mogu postići primenom agregacije konekcija i to direktno na optičkom sloju, kako bi se izbegle konverzije signala u tranzitnim čvorovima. Takođe, objašnjena je potrebna arhitektura čvorova mreže za podršku optičke agregacije. Na primeru manje mreže ilustrovani su rezultati uštede resursa mreže primenom postupka optičke agregacije. Bitno je naglasiti da su uštede resursa znatno veće za mreže većih dimenzija, pa je intencija da se tehnika optičke agregacije primenjuje prilikom planiranja i projektovanja budućih elastičnih optičkih mreža. Obzirom na veliku kompleksnost egzaktnih metoda za rešavanje posmatranog problema, odnosno mogućnostima njihove primene samo u slučaju male dimenzionalnosti problema sa jedne strane, i kvaliteta rešenja dobijenih primenom heurističkih algoritama sa druge strane, nameće se potreba za razvojem metaheurističkih algoritama koji mogu efikasno da pronađu visoko kvalitetna rešenja čak i u scenarijima povećane kompleksnosti problema. Razvoj takvih algoritama biće predmet daljih istraživačkih interesovanja autora u ovoj oblasti.

Zahvalnica

Ovaj rad delimično je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru projekta pod brojem TR-32025.

Literatura

- [1] *ITU-T Recommendation G.694.1*, "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid", ITU-T Geneva, 2012.
- [2] S. Talebi et al., „Spectrum management techniques for elastic optical networks: A survey”, *Optical Switching and Networking*, vol. 13, pp. 34-48, July 2014.
- [3] G. Thouenon et al., „Electrical v/s optical aggregation in multi-layer optical transport networks”, *International Conference on Photonics in Switching*, Proceedings, pp. 28-30, Italy, 2015.
- [4] O. Gerstel, „Flexible use of spectrum and photonic grooming”, *Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics and Photonics and Switching Conference*, Proceedings pp. PMD3, USA, 2010.
- [5] M. Jinno et al., „IP traffic offloading to elastic optical layer using multi-flow optical transponder”, *European Conference and Exhibition on Optical Communication*, Proceedings, pp. 1-3, Geneva, 2011.
- [6] O. Gerstel et al., „Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 2, pp. 12-20, 2012.
- [7] G. Zhang et al., „Optical traffic grooming in OFDM-based elastic optical networks [Invited]”, *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 4, no. 11, pp. B17–B25, 2012.
- [8] L. Guo et al., „Green grooming in spectrum-sliced elastic optical path networks”, *Photonic Network Communications*, vol. 32, no. 1, pp. 115-125, 2016.
- [9] Y. Tan et al., „Energy efficient routing, modulation and spectrum allocation in elastic optical networks”, *Optical Fiber Technology*, vol. 36, pp. 297-305, 2017.

- [10] M. Zhang et al., „On the parallelization of spectrum defragmentation reconfigurations in elastic optical networks”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 24, no. 5, pp. 2819-2833, 2016.
- [11] J. Wu et al., „Energy-efficient survivable grooming in software-defined elastic optical networks”, *IEEE Access*, vol. 5, pp. 6454-6463, 2017.
- [12] S. Miladić-Tešić et al., „Traffic grooming technique for elastic optical networks: A survey“, *Optik*, vol. 176, pp. 464-475, 2019.
- [13] B. C. Chatterjee et al., „Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1776-1800, 2015.
- [14] A. Mitra et al., „Network equipment and their procurement strategy for high capacity elastic optical networks”, *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, no. 7, pp. A201-A211, 2016.
- [15] A. Peters et al., „Key performance indicators for elastic optical transponders and ROADMs: The role of flexibility”, *Optical Switching and Networking*, vol. 25, pp. 1-12, July 2017.
- [16] Zhang et al., „Dynamic traffic grooming in sliceable bandwidth-variable transponder-enabled elastic optical networks”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 1, pp. 183-191, 2015.
- [17] N. Dharmaweera et al., „Traffic-grooming- and multipath-routing-enabled impairment-aware elastic optical networks”, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol.8, no 2, pp. 58-70, Feb.2016.
- [18] P.D. Choudhury, N. Agarwal, T. De, Spectrum and splitter utilization efficient traffic grooming routing and spectrum assignment in elastic optical networks, *Proc. IEEE SPICES*, (2017), pp. 1-6

Abstract: *Elastic optical networks are considered as a promising solution for efficient usage of optical network resources, since fixed channel because fix channel spacing leaves a lot of much of the available bandwidth wasted, what is the lack of traditional DWDM technology. An important issue in optical network design is the possibility of traffic grooming as one of the traffic engineering techniques, which aims to optimize the usage of network resources. The aim of this paper is to present in detail the concept and benefits of applying the traffic grooming technique as well as the hardware possibilities for its realization. The optical grooming as an extended version of the inherent RSA (Routing and Spectrum Allocation) problem has been analysed in networks with static traffic demands. The results of the network resources savings, in terms of the total spectrum usage and the number of optical transmitters, achieved by application of traffic grooming procedure in elastic optical networks are presented by a simple illustrative example.*

Keywords: *elastic optical networks, optical grooming, network resources*

TRAFFIC GROOMING TECHNIQUE AND DIMENSIONING OF ELASTIC OPTICAL NETWORK RESOURCES

Goran Marković and Suzana Miladić-Tešić