

ANALIZA RSA ALGORITAMA U ELASTIČNIM OPTIČKIM MREŽAMA

Suzana Miladić-Tešić¹, Dejan Miljanović²

¹Univerzitet u Istočnom Sarajevu - Saobraćajni fakultet, suzana.miladic@stfdoboj.net

²Mtel a.d. Banjaluka, dejan.miljanovic@mtel.ba

Sadržaj: *Nova generacija optičkog umrežavanja javila se kao rezultat povećanih korisničkih zahteva i potrebe za efikasnim i isplativim korišćenjem spektra i propusnog opsega. Fleksibilno podržavanje različitih binarnih protoka prema specifičnim zahtevima korisnika predstavlja ključnu prednost nove generacije optičkih mreža poznatih i kao elastične optičke mreže (EON). Veliki broj problema koje treba rešavati u EON mrežama u sebi kao potproblem sadrži i problem rutiranja i dodele/alokacije propusnog opsega-RSA (Routing and Spectrum Allocation). Iz tog razloga, efikasnim rešavanjem RSA problema utiče se i na kvalitet rešavanja ostalih pitanja mreže. Osnovni cilj ovog rada jeste detaljan prikaz i analiza aktuelnih RSA algoritama predloženih za EON i njihovo poređenje sa nekoliko aspekata. Algoritmi su podeljeni u dve kategorije: statičke i dinamičke, a zatim su predstavljene njihove karakteristike i kriterijumske funkcije koje se najčešće pojavljuju u literaturi.*

Ključne reči: *elastična optička mreža, frekvencijski slot, rutiranje i alokacija propusnog opsega*

1. Uvod

Ogroman rast saobraćaja za telekomunikacione operatore podrazumeva promene u širini propusnog opsega a za koji je očekivati da će se u bliskoj budućnosti kretati u granicama od nekoliko Gb/s do nivoa Tb/s. Time je postalo izvesno da postojeća WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) tehnologija neće biti u mogućnosti da efikasno podrži sve buduće saobraćajne zahteve. Dva ozbiljna nedostatka navedene tehnologije su: 1) fiksni razmak između kanala od 100 ili 50 GHz (tzv. *fix-grid*) bez obzira na veličinu zahteva što za posledicu ima veliku neiskorišćenost spektra i 2) u slučaju zahteva koji su veći od kapaciteta talasne dužine prenos se odvija preko više kanala (talasne dužine) što za posledicu ima upotrebu zaštitnog opsega čime se smanjuje efikasnost upotrebe optičkog spektra. Dakle, čak i u slučaju postojanja dovoljno širokih propusnih opsega, prenos velikim brzinama (iznad 100 Gb/s) bio bi teško ostvariv sa visokom spektralnom efikasnošću, posebno na većim distancama. Ukoliko bi se koristila adaptivna (*flex-grid*) oprema, koja bi svoje parametre prilagođavala individualnim saobraćajnim zahtevima i aktuelnim transmisionim uslovima, mogla bi se postići maksimizacija spektralne

efikasnosti i povećanje transmisionih kapaciteta. Efikasnom i skalabilnom upotrebom spektralnih resursa moglo bi se postići smanjenje operativnih troškova mreže.

Elastična optička mreža, EON (*Elastic Optical Network*) omogućava da se propusni opseg dodeli putevima svetlosti u skladu sa saobraćajnim zahtevima (koncept *bandwidth on demand*). Uvođenjem koncepta elastičnosti u optički domen, postojeće *fix-grid* WDM mreže migriraju ka *flex-grid* arhitekturama koje se smatraju potencijalnom solucijom za optičke transportne mreže naredne generacije.

Ključni problem u dizajnu, planiranju i funkcionisanju EON mreža se odnosi na rutiranje i alokaciju propusnog opsega, RSA (*Routing and Spectrum Allocation*). Prvi deo RSA podrazumeva pronalazak raspoložive fizičke rute između para čvorova, dok drugi podrazumeva dodelu odgovarajućih frekvencijskih slotova u okolini centralne učestanosti, odnosno dela opsega na zahtevanom putu svetlosti. RSA problem u EON mrežama ekvivalentan je problemu RWA u tradicionalnim („*fixed grid*”) WDM optičkim mrežama. Pošto veliki broj EON problema u sebi kao potproblem sadrži i RSA, pronalazak kvalitetnih RSA rešenja predstavlja imperativ. Obzirom da algoritmi koji su razvijeni za klasične *fix-grid* mreže ne mogu biti direktno primenjeni na EON mreže, brojna istraživanja su posvećena rešavanju ovog problema odnosno pronalasku visoko kvalitetnih RSA rešenja [1-7].

Osnovni cilj ovog rada jeste prikaz aktuelnih RSA algoritama i njihovo poređenje sa nekoliko aspekata. Algoritmi su podeljeni na statičke i dinamičke RSA, a zatim su predstavljene njihove karakteristike i kriterijumske funkcije koje se najčešće pojavljuju u literaturi.

2. Osnovni koncepti elastičnih optičkih mreža

Ključne karakteristike i prednosti EON mreža koje uključuju segmentaciju propusnog opsega, odnosno zauzimanje samo onog dela opsega koji je neophodan za dati saobraćajni zahtev (koncept podkanala), agregaciju propusnog opsega (koncept superkanala) koji će omogućiti podršku veoma velikih brzina prenosa po kanalu (400Gb/s ili čak do 1Tb/s, u poređenju sa današnjim 100Gb/s), podršku elastičnih brzina prenosa, varijabilno alokiranje resursa, povećanu spektralnu efikasnost primenom OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) tehnologije, kao i poboljšanu energetsku efikasnost prikazane su u [8]. Arhitektura optičke mreže koja bi podržala koegzistenciju fiksnog i fleksibilnog grida i moguće strategije migracije tradicionalnih WDM ka EON mrežama detaljno su analizirane u [9, 10] respektivno. Rezime osnovnih koncepata EON mreža dat je u nastavku rada.

2.1. Koncept frekvencijskog slota

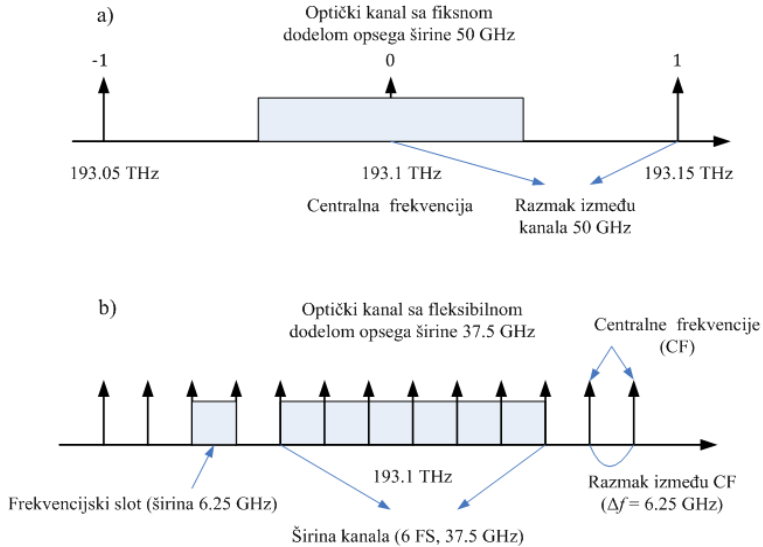
Da bi se bolje iskoristio ograničeni opseg frekvencija u optičkim mrežama, razmak između kanala multipleksiranih po talasnim dužinama mora da se smanji. Zbog toga je ITU-T preporukom G.694.1 [11] standardizovana fleksibilnost WDM optičkih mreža i koncept frekvencijskog slota FS (*Frequency Slot*). Na taj način se kompletan optički spektar deli na slotove sa širinom od 25, 12.5 ili čak 6.25 GHz. Ta širina slota predstavlja najmanji opseg učestanosti optičkog kanala. U literaturi se često koristi termin *slice* za grupu FS koji imaju centralnu frekvenciju f_c . Deo opsega koji je dodeljen određenom putu svetlosti (optički kanal) karakteriše centralna frekvencija, širina slota

f_{slot} (jednaka razmaku između kanala), najmanji i najveći indeks slota (n_l i n_h) odnosno početna i krajnja frekvencija. Centralna frekvencija i širina dodeljenog opsega f_w su po ITU-T standardizaciji dati kao:

$$f_c = 193.1 + \left(\frac{n_l + n_h}{2} \right) f_{slot} \quad (1)$$

$$f_w = (n_h - n_l + 1) f_{slot} \quad (2)$$

Na Slici 1 je prikazana je razlika između fiksnog i fleksibilnog grida. Sa slike je evidentno da se širina kanala u slučaju fiksnog i fleksibilnog grida razlikuje za 12.5 GHz odnosno taj deo opsega se nepotrebno koristi kada je razmak između kanala fiksni.



Slika 1. ITU-T G.694.1 a) fiksni grid i b) fleksibilni grid [11]

2.2. Ograničenja susedstva i kontinuiteta frekvencijskih slotova

Osnovna ograničenja koja se javljaju pri rešavanju RSA problema odnose se na ograničenja susedstva i kontinuiteta frekvencijskih slotova (*spectrum contiguity and continuity constraints*). Ograničenje susedstva odnosi se na neophodnost rezervisanja susednih frekvencijskih slotova koji će biti korišćeni za uspostavljanje puta svetlosti, dok je drugo ograničenje ekvivalentno ograničenju kontinuiteta talasnih dužina kod RWA problema. Npr. ako neka konekcija zahteva t jedinica propusnog opsega, tada je tom zahtevu potrebno dodeliti t susednih slotova koji moraju biti isti na svim linkovima puta svetlosti (raspoloživost slotova na svim linkovima putanje).

2.3. Arhitektura mreže

Zamena mrežne opreme koja podržava fiksni grid opremom koja podržava fleksibilni grid predstavlja samo pitanje trenutka za operatore telekomunikacionih meža. Na odluku o migraciji ka fleksibilnom konceptu mreže utiće 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. Arhitektura elastične optičke mreže zahteva primenu specifičnih hardverskih elemenata: optičkih kros-konektora promenljivog kapaciteta (*BV-WXC*, *Bandwidth Variable Wavelength Cross-Connect*) za rutiranje elastičnih puteva svetlosti, rekonfigurabilnih optičkih add/drop multipleksera (ROADM) koji se koriste za dinamičko/promenljivo izdvajanje ili prosleđivanje talasnih dužina bez optoelektronske konverzije u čvorovima, kao i adaptivnih optičkih predajnika i prijemnika (*BVT*, *Bandwidth Variable Transponder*), koji se softverski prilagođavaju protoku, vrsti modulacije i centralnoj frekvenciji dolaznog signala. Detaljnije o navedenoj arhitekturi se može pronaći u [8, 9] a evaluacija različitih konfiguracija optičkih mreža sa navedenim elementima se može pronaći u [12], gde su autori predložili modele kojima se mogu kvantifikovati različiti stepeni fleksibilnosti.

3. Problem RSA u EON mrežama

Veliki broj problema koje treba rešavati u elastičnim optičkim mrežama u sebi kao potproblem sadrži i problem rutiranja i dodele/alokacije propusnog opsega- RSA. Izbor pogodnog RSA algoritma je od suštinskog značaja za unapređenje performansi i upravljanje resursima EON mreže. Generalno se dele na statičke i dinamičke algoritme. Neki od njih prvo rešavaju rutiranje, zatim dodelu opsega a neki ta dva potproblema rešavaju zajedno.

3.1. Statički RSA algoritmi

Statički RSA problem podrazumeva unapred poznatu matricu saobraćajnih zahteva. Procedura rešavanja se izvršava u *off-line* režimu. Problem je karakterističan za rešavanje u toku faze planiranja mreža, kao i tokom njihove eksploatacije u slučaju kada se saobraćajni zahtevi ne menjaju tokom nekoliko časova, dana, nedelja ili meseci u toku godine. RSA algoritam u ovom slučaju ima dva zadatka: 1) pronalazak raspoložive fizičke rute između para čvorova i 2) dodela odgovarajućih frekvencijskih slotova u okolini centralne učestanosti odnosno dela opsega zahtevanom putu svetlosti. U nastavku rada dato je nekoliko analiziranih algoritama [6]. Originalni nazivi su dati na engleskom jeziku ali su opisane njihove osnovne karakteristike.

Routing, Wavelength Assignment and Spectrum Allocation (RWSA) - baza za dodelu opsega je talasna dužina - kanal zbog čega se često naziva i rutiranje i dodela kanala. Talasna dužina puta svetlosti podrazumeva najniže indeksiran slot (kojim počinje dostupni opseg frekvencija). Tri su varijante algoritma u zavisnosti od rutiranja i dodele opsega: pohlepni (*greedy* RWSA) gde se zahtevi sortiraju prema funkciji u smislu rastojanja između čvorova i zahtevanog opsega, *Kpaths-RWSA* i *SP-RWSA* (*Shortest Paths-RWSA*) gde je $k=1$ a koji problem rutiranja i dodele opsega rešava objedinjeno.

Adaptive Frequency Assignment- Collision Avoidance (AFA-CA) - dodela frekvencijskih slotova bez mogućnosti spektralnog preklapanja. Kreće se od zahteva sa najvećim kapacitetom (najveći potreban broj FS).

Spectrum Path with Maximum Spectrum Reuse (SPSR) - algoritam se zasniva na ponovnoj upotrebi spektra, prioritet imaju zahtevi većeg kapaciteta. Baza se naziva podnosilac i obuhvata nekoliko susednih FS. Putanje koje nemaju zajedničke linkove mogu ponovo koristiti iste podnosioc.

Balanced Load Spectrum Allocation (BLSA) - algoritam sa ciljem balansiranja saobraćaja u mreži na osnovu čega se biraju putanje. U obzir se uzima opterećenje na vlaknu koje je najviše zagušeno u mreži.

Survivable Multipath Routing and Spectrum Allocation (SM-RSA) - saobraćajni zahtev se razbija na manje elemente koji se dalje rutiraju po višestrukim putanjama. Ovakav način rutiranja se primenjuje jer algoritam uzima u obzir i slučaj otkaza u mreži.

Minimum Interference Routing (MI) – algoritam uzima u obzir i problem fragmentacije opsega na način da bira one putanje koje izazivaju najmanju fragmentaciju. Putanje se biraju na osnovu tzv. vrednosti maksimalnog toka (*maxflow*).

Quality of Service (QoS)-based RSA – algoritam uzima u obzir i obezbeđenje kvaliteta servisa klasifikacijom saobraćajnih zahteva u zahteve višeg i nižeg prioriteta. Nakon pronalaska raspoloživih putanja dele se na putanje višeg i nižeg kvaliteta (HQ i LQ). Algoritam pronalazi najbolje moguće uslove za opsluživanje zahteva višeg prioriteta. U tom smislu ukoliko nema raspoloživih resursa na HQ putanjama, algoritam vrši pretragu LQ putanja čime se vrši njihova fragmentacija.

3.2. Dinamički RSA algoritmi

U dinamičkom saobraćajnom scenariju saobraćajni zahtevi se pojavljuju jedan za drugim u slučajnim vremenskim trenucima i imaju vremenski ograničeno (slučajno) trajanje tj. *online* se procesiraju. Donošenje odluke o uspostavljanju pojedinačnih puteva svetlosti vrši se na osnovu informacija iz prošlosti o stanju mreže do tog trenutka. Dinamički saobraćajni scenario se sve češće sreće u kosnicama mreža kao posledica učestalih varijacija intenziteta saobraćaja Internet servisa. U slučaju da u momentu nailaska zahteva broj frekvencijskih slotova nije dovoljan, zahtev se odbija. U nastavku rada je dato nekoliko analiziranih algoritama [6]. Pojedini originalni nazivi su dati na engleskom jeziku ali su opisane njihove osnovne karakteristike.

Rutiranje zasnovano na spektralnom segmentu - u ovom algoritmu se kompletni optički spektar deli na nekoliko segmenata. U procesu izbora putanje vrši se i agregacija saobraćaja. Izborom prvog raspoloživog segmenta dodeljuje se početna frekvencija. Izabrani segment takođe mora zadovoljiti ograničenje kontinuiteta.

Light-Path Fragmentation Algorithm (LFA) - algoritam se zasniva na razbijanju zahteva većeg kapaciteta na manje zahteve i dodeljuje im resurse koji su slobodni usled fragmentacije. Na taj način se maksimalno iskorištava opseg a fragmentovani resursi svode na minimum.

Adaptive Unconstrained Routing- Exhaustive Spectrum Search (AUR-ESS)- problem rutiranja i dodele opsega se rešava objedinjeno.

The Most Common Available Patterns (MCAP) - algoritam se zasniva na GMPLS protokolu. Rutiranje podrazumeva izbor rute sa maksimalnim brojem raspoloživih resursa (FS) koji se mogu dodeliti zahtevu ali sa ograničenjem broja hopova (*Hop Count- HC*) kako bi se sprečila mogućnost izbora dužih ruta. Zatim se vrši dodela opsega poštujući ograničenje preklapanja spektra (*Collision Aware-Spectrum Allocation- CA-SA*).

Fairness-aware dynamic spectrum allocation algorithm - saobraćajni zahtevi se klasifikuju u različite klase u zavisnosti od potrebnog broja FS. Iz tog razloga su uvedena dva termina: normalizovana verovatnoća blokiranja i indeks ravnopravnog opsluživanja zahteva (*fairness index*). Dva su principa kojim se ovo omogućava: PADR (*Progressive*

Allocation and Dynamic Reallocation) gde se celokupan spektar deli na nekoliko spektralnih blokova koji se ravnopravno dodeljuju svim zahtevima i PSPADR (*Partial Sharing Progressive Allocation and Dynamic Reallocation*) gde se celokupan spektar deli na dva dela: jedan za dodelu resursa svakoj klasi i drugi koji se deli između klasa u slučaju nedostatka resursa.

Dinamički RSA sa kombinovanim brzinama prenosa - ispitivanjem dostupnih putanja (*Sorted Feasible Paths Searching- SPFS*) rešava se problem pronalaska putanje a dodela opsega se vrši fiksno ili adaptivno. Fiksno podrazumeva da se celokupan spektar deli na nekoliko spektralnih segmenata iste fiksne širine a adaptivno da se ukupan spektar deli na nekoliko spektralnih segmenata koji nisu iste veličine.

First-Last Fit spectrum allocation (FLF) - spektar se deli na nekoliko podnosilaca metodom bojenja grafova. *First-Last Fit* se koristi za dodelu opsega.

Tabela 1. Poređenje RSA algoritama

Algoritam	Izbor rute	Dodela opsega	Baza
Greedy-RWSA	BFS (Bread First Search), ispituje susedne čvorove	Greedy-RWSA	Talaska dužina
KPaths-RWSA	KSP (K-Shortest Paths)	KPaths-RWSA	Talaska dužina
SP-RWSA	KSP, ($k=1$)	SP-RWSA	Talaska dužina
AFA-CA	SP (Shortest Path)	AFA-CA	FS
SPSR	SP	First-Fit (FF)	Podnosilac
BLSA	KSP	First Fit	Podnosilac
SM-RSA	Bhandari algoritam	SM-RSA	Podnosilac
MI-RSA	Dijkstra	FF	Podnosilac
MI-PRSA-FF	Dijkstra	FF	Podnosilac
QPS	Floyd-Warshal	FF, Random	FS
QPF	Floyd-Warshal	FF, Random	FS
Rutiranje zasnovano na segmentu	Fiksno, Fiksno-Alternativno, Adaptivno	FF, Random, MR (Minimum Residual-minimalni ostatak FS)	Spektralni segment
LFA	KSP	SP-FF	FS
AUR-ESS	Dijkstra	AUR-ESS (<i>Exhaustive</i>)	FS
MCAP	HC-MCAP	CA-SA	FS
PADR	-	FF	Spektralni blok
PSPADR	-	FF	Spektralni blok
FS-SFPS	SFPS	Fiksna segmentacija	Spektralni segment
AS-SFPS	SFPS	Adaptivna segmentacija	Spektralni segment
FLF	-	FLF	Podnosilac

4. Uporedne karakteristike i analiza RSA algoritama

U ovom poglavlju RSA algoritmi su poređeni sa kvalitativnog i kvantitativnog aspekta. Sa aspekta granularnosti (širine spektra) algoritmi su podeljeni u pet grupa i to po veličini baze: frekvencijski slot (FS), podnosilac - sastoji se od nekoliko FS, talasna dužina, spektralni blok - sastoji se od većeg broja susednih podnosilaca i spektralni segment - celi spektar se deli na nekoliko definisanih segmenata (fiksne ili adaptivne veličine). U svakom od algoritama taj broj na koji se deli celokupan opseg utiče na složenost samog algoritma i na performanse mreže koje se optimizuju.

4.1. Kvalitativno poređenje RSA algoritama

U Tabeli 1 sažeti su RSA algoritmi u smislu izbora rute, dodele opsega te granularnosti odnosno širine dela opsega koji se dodeljuje (baza). Tabela 2 prikazuje karakteristike i kriterijumske funkcije svakog od algoritama, kao i scenario saobraćaja.

Tabela 2. Karakteristike svakog od RSA algoritama

Algoritam	Karakteristike	Saobraćajni scenario
RWSA	Poboljšava efikasnost iskorišćenja spektra, energetska efikasnost i smanjuje troškove mreže	Statički
AFA-CA	Smanjuje broj zauzetih FS	Statički
SPSR	Smanjuje preklapanje putanja Bez balansiranja opterećenja u mreži	Statički
BLSA	Povećava preklapanje putanja Balansiranje opterećenja u mreži	Statički
SM-RSA	Minimizacija upotrebe spektra Mogućnost rezervacije većeg broja podnosilaca od potrebnog	Statički
MI	Smanjuje verovatnoću blokiranja toka	Statički
QoS-RSA	Smanjuje verovatnoću blokiranja	Polustatički
Rutiranje zasnovano na spektralnom segmentu	(1) Niska iskorišćenost spektra, velika brzina signalizacije blokade za zahteve manjeg kapaciteta (2) Visoka iskorišćenost spektra, mala brzina signalizacije blokade za zahteve većeg kapaciteta	Dinamički
LFA	Poboljšava prosečnu iskorišćenost predajnika i verovatnoću blokiranja	Dinamički
AUR-ESS	Smanjuje verovatnoću blokiranja	Dinamički
MCAP	Smanjuje verovatnoću blokiranja rutiranja i verovatnoću blokiranja prosleđivanja	Dinamički
Fairness-aware	Smanjuje verovatnoću blokiranja	Dinamički
Dinamički RSA sa kombinovanim brzinama prenosa	Smanjuje verovatnoću blokiranja i fragmentaciju spektra	Dinamički
FLF	Maksimizacija iskorišćenosti spektra	Dinamički

4.2. Kvantitativno poređenje RSA algoritama

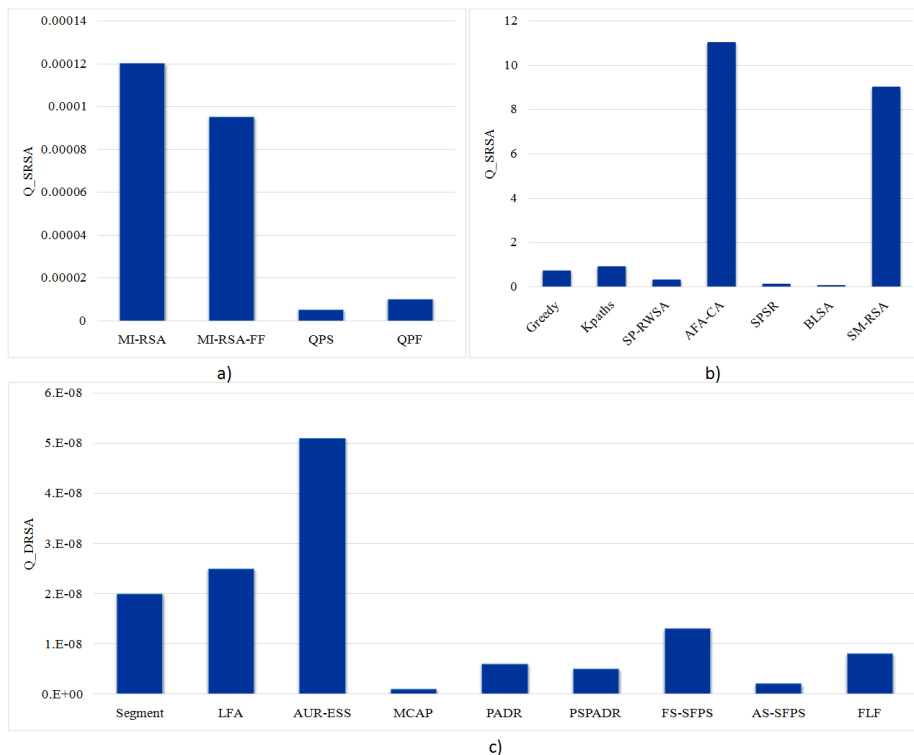
Statički algoritmi u većini slučajeva kao kriterijumsku funkciju imaju minimizaciju upotrebe spektra odnosno poboljšavaju stepen iskorišćenosti spektralnih resursa (*SRSAS*) ili minimizaciju verovatnoće blokiranja (*SRSAB*), dok se dinamički algoritmi uglavnom baziraju na minimizaciju verovatnoće blokiranja (*DRSA*). Faktori, na osnovu kojih se pojedini algoritmi mogu porediti uzimajući u obzir navedene kriterijumske funkcije dati su sledećim izrazima [6]:

$$Q_{SRSAB} = \frac{\text{VerovatnoćaBlokiranja}}{\text{Saobraćaj} \times |N| \times |L| \times |S|} \quad (3)$$

$$Q_{SRSAS} = \frac{\text{IskorišćenostSpektra}}{\text{Saobraćaj} \times |N| \times |L| \times |S|} \quad (4)$$

$$Q_{DRSA} = \frac{\text{VerovatnoćaBlokiranja}}{\text{Saobraćaj} \times |N| \times |L| \times |S|} \quad (5)$$

gde su N - broj čvorova mreže, L - broj linkova i S - broj slotova. Vrednosti verovatnoće blokiranja i iskorišćenosti spektra su preuzete iz [6].



Slika 2. Evaluacija performansi RSA algoritama: a) statički RSA- verovatnoća blokiranja b) statički RSA- iskorišćenost spektra i c) dinamički RSA- verovatnoća blokiranja [6]

Kako bi poređenje bilo preciznije moguće je menjati parametar S , tako da se u istu grupu mogu svrstati svi algoritmi kojima je baza npr. spektralni blok, a u drugu grupu kojima je baza segment itd. Vrednosti Q faktora su prikazane na Slici 2. Iz grupe statičkih RSA algoritama koji minimiziraju verovatnoću blokiranja najbolje rezultate daje QPS. Iz grupe statičkih RSA kojima se maksimizira iskorišćenost spektra najbolje rezultate daje AFA-CA a zatim SM-RSA. Na kraju, kod dinamičkih RSA algoritama koji minimiziraju verovatnoću blokiranja najbolje rezultate daje MCAP.

4.3. Računarska složenost RSA algoritama

U zavisnosti od metoda rutiranja složenosti su drugačije u smislu broja operacija koje algoritam izvršava. Ukoliko je baza algoritma manja, složenost je veća i obrnuto. Najmanja granularnost jeste kada je baza FS, zatim podnosilac, spektralni blok, segment pa talasna dužina. U tom smislu, broj FS je uvek veći od broja podnosilaca, broj podnosilaca od broja spektralnih segmenata itd. pa taj parametar povećava odnosno smanjuje složenost algoritma. Uzimajući to u obzir, algoritmi su podeljeni u četiri grupe.

Prvu grupu čine algoritmi BLSA, SPSR, AFA-CA i SM-RSA koji imaju najviši nivo računarske složenosti. Druga grupa algoritama FLF, QPS, QPF i AUR-ESS ima manju složenost. Zatim dolaze algoritmi treće grupe (Greedy RWSA, Kpath RWSA, SP RWSA, MI-RSA, bazirani na segmentu, PADR, PSADR, MCAP) sa još manjim nivoom računarske složenosti. Četvrtu grupu čine algoritmi sa najmanjom računarskom složenošću (MI-PRSA, LFA, FS-SFPS, AS-SFPS) a iz ove grupe najmanje računarski složen je algoritam MI-PRSA.

5. Zaključak

U radu su analizirani aktuelni algoritmi koji se koriste za rešavanje RSA problema u EON mrežama. U obzir su uzete obe kategorije sa aspekta saobraćajnog scenarija, statički i dinamički algoritmi. Kvalitativna i kvantitativna analiza je omogućila da se algoritmi uporede sa aspekta složenosti, verovatnoće blokiranja zahteva te efikasnosti iskorišćenja spektra. Efikasnost algoritma zavisi od granularnosti baze. Sa jedne strane baza utiče na složenost algoritma a s druge utiče na veću ili manju verovatnoću blokiranja odnosno iskorišćenje spektra ili neku drugu performansu.

Literatura

- [1] 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, August 2015.
- [2] R. W. Alaskar et al., „Offline routing and spectrum allocation algorithms for elastic optical networks“ *Optical Switching and Networking*, vol. 21, pp. 79-92, July, 2016.
- [3] A. Alyatama et al., „Adaptive routing and spectrum allocation in elastic optical networks“, *Optical Switching and Networking*, vol. 24, pp. 12-20, April, 2017.
- [4] M. Klinkowski et al., „Solving large instances of the RSA problem in flexgrid elastic optical networks“, *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, no. 2, pp. 320-330, 2016.

- [5] F. Lezama et al., „Differential evolution optimization applied to the routing and spectrum allocation problem in flexgrid optical networks“, *Photonic Network Communications*, vol. 31, no. 1, pp. 129-146, 2016.
- [6] F. S. Abkenar, A. G. Rahbar, „Study and analysis of routing and spectrum allocation (RSA) and routing, modulation and spectrum allocation (RMSA) algorithms in elastic optical networks (EONs)“, *Optical Switching and Networking*, vol. 23, Part 1, pp. 5-39, January, 2017.
- [7] G. Marković, „Routing and spectrum allocation in elastic optical networks using bee colony optimization“, *Photonic Network Communications*, pp. 1-19, July 2017.
- [8] S. Miladić, G. Marković, “Elastične optičke mreže”, *XXXIII Simpozijum o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju– PosTel*, str. 241-251, Beograd, decembar, 2015.
- [9] G. Marković, S. Miladić, “Elastično optičko umrežavanje- od istraživanja do implementacije”, *XXXIV Simpozijum o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju– PosTel*, str. 243-252, Beograd, decembar, 2016.
- [10] X. Yu et al., „Migration from fixed grid to flexible grid in optical networks“, *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 2, pp. 34-43, Februar, 2015.
- [11] *ITU-T Recommendation G.694.1*: “Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid”, ITU-T Geneva, 2012.
- [12] 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.

Abstract: *The new generation of optical networking rised as a result of increasing users' traffic demands and the need for efficient and cost-effective usage of spectrum and bandwidth in optical networks. Adaptable features and possibilities to adjust data rates to fit specific client demands are the key advantages of new generation of optical networks known as elastic optical networks (EON). A large number of instances that should be solved in EON also includes routing and spectrum allocation - RSA as a subproblem. Therefore, efficiently RSA solving affects the quality of other network instances. The main objective of this paper is to review, analyze and compare the existing RSA algorithms in EONs. The algorithms are divided as static and dynamic ones with their main features and objectives most frequently appeared in the literature.*

Keywords: *elastic optical network, frequency slot, routing and spectrum allocation*

ANALYSIS OF RSA ALGORITHMS IN ELASTIC OPTICAL NETWORKS

Suzana Miladić-Tešić, Dejan Miljanović