

ELASTIČNO OPTIČKO UMREŽAVANJE – OD ISTRAŽIVANJA DO IMPLEMENTACIJE

Goran Marković¹, Suzana Miladić^{1,2}

¹Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet,

²Univerzitet u Istočnom Sarajevu - Saobraćajni fakultet,
g.markovic@sf.bg.ac.rs, suzana.miladic@stfdoboj.net

Sadržaj: *Mogućnost fleksibilnog održavanja različitih binarnih protoka prema specifičnim zahtevima korisnika predstavlja ključnu prednost elastičnih optičkih mreža. Elastične optičke mreže (EON) predstavljaju obećavajuće tehnološko rešenje za efikasno korišćenje optičkih mrežnih resursa, obzirom da fiksni razmak između kanala, kojim veliki deo raspoloživog opsega ostaje neiskorišćen, predstavlja veliki nedostatak tradicionalne WDM tehnologije. Međutim, kao i pri svakom prelasku na novu tehnologiju, biće neophodno obezbediti njihovu koegzistenciju, što podrazumeva rešavanje brojnih problema u arhitekturi mreže. U radu se analiziraju ključni problemi koje će biti neophodno rešiti kako bi se podržala koegzistencija tehnologija fiksnog i fleksibilnog grida, međusobno funkcionisanje čvorova sa i bez elastičnosti, kao i neophodna oprema koju treba da ima svaki čvor kako bi podržao fleksibilni grid. Razmatrane su potencijalne strategije migracije postojećih WDM ka EON i ključni izazovi sa kojima će mrežni operatori biti suočeni pri prelasku na buduću flex-grid tehnologiju.*

Ključne reči: *elastične optičke mreže, strategija migracije, koegzistencija*

1. Uvod

Aktuelno rešenje koje operatori telekomunikacionih mreža koriste kako bi omogućili prenos velikog agregatnog saobraćaja u transportnim mrežama je DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) tehnologija, zasnovana na korišćenju proširenog spektra (80 ili više) talasnih dužina. U današnjim DWDM mrežama, koje su realizovane kao mreže sa komutacijom kola, komunikacija između krajnjih čvorova ostvaruje se posredstvom svetlosnog puta, odnosno optičke konekcije između izvornog i odredišnog čvora, kojoj se dodeljuje odgovarajuća talasna dužina duž izabrane fizičke rute. Nakon uspostave puta svetlosti, talasna dužina ostaje zauzeta na svim linkovima za sve vreme trajanja veze, odnosno svakom saobraćajnom zahtevu se, nezavisno od njegove veličine, dodeljuje celokupan raspoloživi kapacitet talasne dužine. Obzirom da su korisnički saobraćajni zahtevi uobičajeno znatno manji od raspoloživog kapaciteta talasne dužine, veliki deo dostupnog propusnog opsega ostaje praktično neiskorišćen. Ovo predstavlja ozbiljan nedostatak DWDM tehnologije. Takođe, postalo je sasvim

izvesno da postojeća WDM tehnologija, koja podržava standardne protoke od 10 Gb/s i 40 Gb/s, a poslednjih godina i brzine do 100 Gb/s po talasnoj dužini koristeći fiksni razmak između kanala od 100 ili 50 GHz (tzv. “*fix-grid*”), neće biti u mogućnosti da efikasno podrži sve buduće saobraćajne zahteve. 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.

Mogućnost fleksibilnog podržavanja različitih binarnih protoka prema specifičnim zahtevima korisnika predstavlja ključnu prednost elastičnih optičkih mreža (*EON, Elastic Optical Networks*) u odnosu na tradicionalne WDM mreže. To ih čini izuzetno atraktivnom solucijom za implementaciju od strane operatora transportnih mreža, jer eksponencijalno povećanje obima saobraćaja neminovno dovodi do dostizanja granice fizičkog kapaciteta optičkog vlakna, pa će u bliskoj budućnosti zahtev za racionalnim korišćenjem ovog resursa predstavljati imperativ.

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 WDM optičkih mreža i koncept frekvencijskog slota (*FS, Frequency Slot*) sa širinom od 12.5 GHz, koji predstavlja najmanji opseg učestanosti optičkog kanala.

Elastična optička mreža 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 trenutno smatraju obećavajućom solucijom za optičke transportne mreže naredne generacije. Njihove ključne karakteristike i prednosti 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 alociranje resursa, povećanu spektralna efikasnost primenom OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) tehnologije, kao i poboljšanu energetska efikasnost [2].

Međutim, kao i svaki prelaz na novu tehnologiju, usled problematike koja se javlja u arhitekturi mreže, neophodna će biti koegzistencija postojećih WDM mreža sa *flex-grid* mrežama. Pošto je ova oblast trenutno u razvojnoj fazi, aktuelna istraživanja posvećena su rešavanju brojnih izazovnih problema, poput dizajna arhitekture EON mreža, mehanizmima alokacije propusnog opsega, agregaciji saobraćaja na optičkom nivou, tehnikama upravljanja spektrom, pitanju skalabilnosti, kvaliteta servisa, razvoju nove kontrolne ravni i dr. [3-8].

Cilj ovog rada je da ukaže na ključne aspekte koji se odnose na arhitekturu optičke mreže koja bi podržala koegzistenciju fiksnog i fleksibilnog grida, a koja bi za operatore telekomunikacionih mreža predstavljala kompromisnu soluciju između očekivanih benefita i troškova implementacije *flex-grid* opreme. Prikazane su određene

strategije migracije tradicionalnih WDM ka elastičnim optičkim mrežama, kao i interesantna pitanja odnosno izazovi sa kojima će se sretati mrežni operatori u procesu migracije sa jedne na drugu tehnologiju. Ta pitanja se prvenstveno odnose na izbor najboljih lokacija i broja čvorova mreže koji će prvo biti nadograđeni kako bi podržali koncept fleksibilnosti u zavisnosti od topologije mreže, saobraćajnog opterećenja, uskih grla mreže, postavljenog cilja itd.

Rad je organizovan na sledeći način. U Sekciji 2 opisan je koncept arhitekture budućih transportnih mreža u kojima će biti omogućena koegzistencija fiksnog i fleksibilnog optičkog umrežavanja. Sekcija 3 posvećena je potencijalnim scenarijima, odnosno strategijama koje će operatorima mreža omogućiti postepeni prelazak na flex-grid tehnologiju. Analizirani su ključni izazovni problemi i mogući načini njihovog rešavanja. U poslednjoj sekciji data su odgovarajuća zaključna razmatranja.

2. Optička transportna mreža sa koegzistencijom fiksnog i fleksibilnog grida

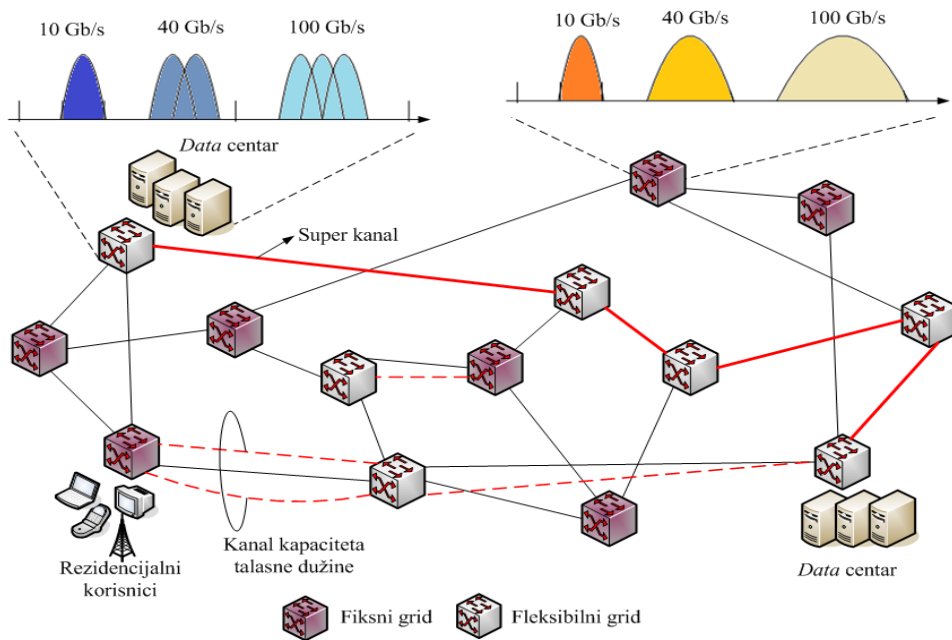
Zamena mrežne opreme koja podržava fiksni grid opremom koja podržava fleksibilni grid predstavlja samo pitanje trenutka za operatore telekomunikacionih mreža. Na odluku o migraciji ka fleksibilnom konceptu mreže utiče nekoliko ključnih faktora kao što su: kompromis između očekivanih benefita i ukupnih troškova instalacije nove opreme, kompatibilnost sa postojećim sistemima, složenost upravljanja mrežom i dr. Arhitektura elastične optičke mreže zahteva primenu specifičnih hardverskih komponenta: optičkih kros-konektora promenljivog kapaciteta (*BV-OXC*, *Bandwidth Variable Optical Cross-Connect*) za rutiranje elastičnih puteva svetlosti, rekonfigurabilnih optičkih add/drop multipleksa (ROADM) koji se koriste za dinamičko 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.

S jedne strane, navedena oprema za uvođenje fleksibilnosti u optičke mreže još uvek nema prihvatljivu cenu za širu primenu. Ekonomski gledano, ne bi bilo isplativo da se fleksibilnost uvede odjednom na nivou cele mreže. S druge strane, pre nego što se u potpunosti iscrpi postojeći kapaciteti optičkih transportnih mreža, trenutna mreža sa fiksnim gridom mora biti maksimalno operativna u toku procesa migracije da bi se isplatila prethodna investiranja.

2.1. Arhitektura mreže

U realnim situacijama, u mreži uvek postoje čvorovi sa većim intenzitetom saobraćaja u odnosu na ostale, što ih čini potencijalno uskim grlom (npr. *data centri*). Ovakvi čvorovi generišu velike količine saobraćaja i tu je potrebna agregacija propusnog opsega tj. potrebno je grupisati više optičkih puteva u jedan da bi izlaz bio tzv. super kanal. Na primer, moguće je 3 kanala kapaciteta po 100 Gb/s multipleksirati korišćenjem OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) tehnike u jedan super kanal sa protokom od 300 Gb/s. U takvim čvorovima, oprema koja prouzrokuje usko grlo mreže se treba zameniti opremom koja podržava različite binarne protoke odnosno fleksibilni grid (Slika 1).

Pošto će uvođenje čvorova sa opremom koja podržava fleksibilni razmak između kanala (*flex grid* čvor) povećati kapacitet samo nekih čvorova, pitanje koje se javlja jeste kako rešiti problem koegzistencije, odnosno međusobne operativnosti tehnologija fiksnog i fleksibilnog grida. Ključnu ulogu u prosleđivanju talasnih dužina u tranzitnim čvorovima imaju ROADM koji u klasičnim WDM mrežama podržavaju ITU-T definisane centralne frekvencije i razmak između kanala (50 ili 100 GHz), bez obzira na opseg koji je potreban za pojedinačni zahtev (*fix grid* čvor). Dakle, mrežna oprema kao što su svičevi, multiplekseri, predajnici i prijemnici moraju se prilagođavati ovom razmaku tj. fiksnom gridu. Fleksibilni ROADM koji se tipično sastoji od nekoliko komutatora talasnih dužina promenljivog kapaciteta BV-WSS (*Bandwidth Variable Wavelength Selective Switches*) ne mora striktno da podržava fiksni grid, već može da prosleđuje nekoliko slotova kao jedan zahtev, a širina jednog slota može biti 12.5 ili 6.25 GHz. Pre nego što svi čvorovi mreže budu u mogućnosti da podrže fleksibilnost, biće neophodna interoperabilnost *fix* i *flex grid* čvorova. Jedno od izazovnih pitanja koje se nameće je sledeće: kako će čvorovi sa opremom za fleksibilni grid funkcionisati u mreži sa postojećim *fix grid* čvorovima? Odgovor i mogući izazovi koji se javljaju u smislu rutiranja puteva svetlosti, dodele talasnih dužina i alociranja frekvencijskih slotova opisani su u nastavku rada.



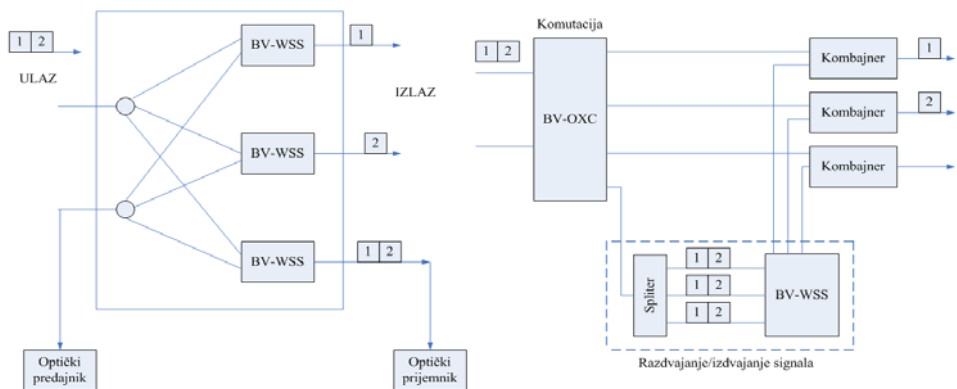
Slika 1. Arhitektura mreže sa koegzistencijom fiksnog i fleksibilnog grida [8]

2.2. Arhitektura *flex-grid* čvora

Da bi se realizovao koncept fleksibilnosti neophodno je da se čvorovima mreže dodaju određene funkcije. Svaki BV-OXC alocira odgovarajući opseg kako bi se uspostavila optička konekcija s kraja na kraj. Prema tome, BV-OXC mora da podesi

veličinu prozora komutacije na fleksibilan način koji će odgovarati spektralnoj širini dolaznog signala. U tu svrhu koriste se komutatori talasnih dužina promenljivog kapaciteta BV-WSS, što naravno strukturu čvora čini kompleksnijom i povećava troškove njegove implementacije. Obično se jedan ROADM sastoji od nekoliko povezanih WSS koji se baziraju na jednoj od sledećih tehnologija: optički mikroelektromehanički sistemi (MEMS), optički komutatori bazirani na tečnim kristalima sa silicijumom (LICOS), komutatori na bazi planarnih talasovoda (PLCs). Svi su zasnovani na osobini da materijal od koga su napravljeni menja optička svojstva (indeks prelamanja) ako se unese u električno polje. U budućnosti se očekuje pad cena ovih komponenata što bi uticalo na njihovu masovnu upotrebu u optičkim mrežama naredne generacije. Dve su najčešće arhitekture *flex-grid* čvorova kao sastavnih elemenata EON mreže: *broadcast-and-select* i *shared splitting* arhitektura, a od njihovih implementacija zavisi gubitak snage signala [9].

Broadcast-and-select arhitektura (prikazana na Slici 2 -levo) podrazumeva da se spektar dolaznog optičkog tunela prenosi na sve izlazne portove i dalje filtrira različitim BV-WSS kako bi se dobio zahtevani spektar na svakom izlaznom portu. Arhitektura je jednostavna, ali se ne može koristiti za prenos na velikim udaljenostima, jer nije ekonomski isplativa obzirom da svaki izlazni port mora imati po jedan BV-WSS. Osim toga, razdvajanje signala kroz sve čvorove mreže smanjuje njegovu snagu, što utiče na detekciju signala na prijemnoj strani.



Slika 2. Arhitekture *flex-grid* čvorova [9]

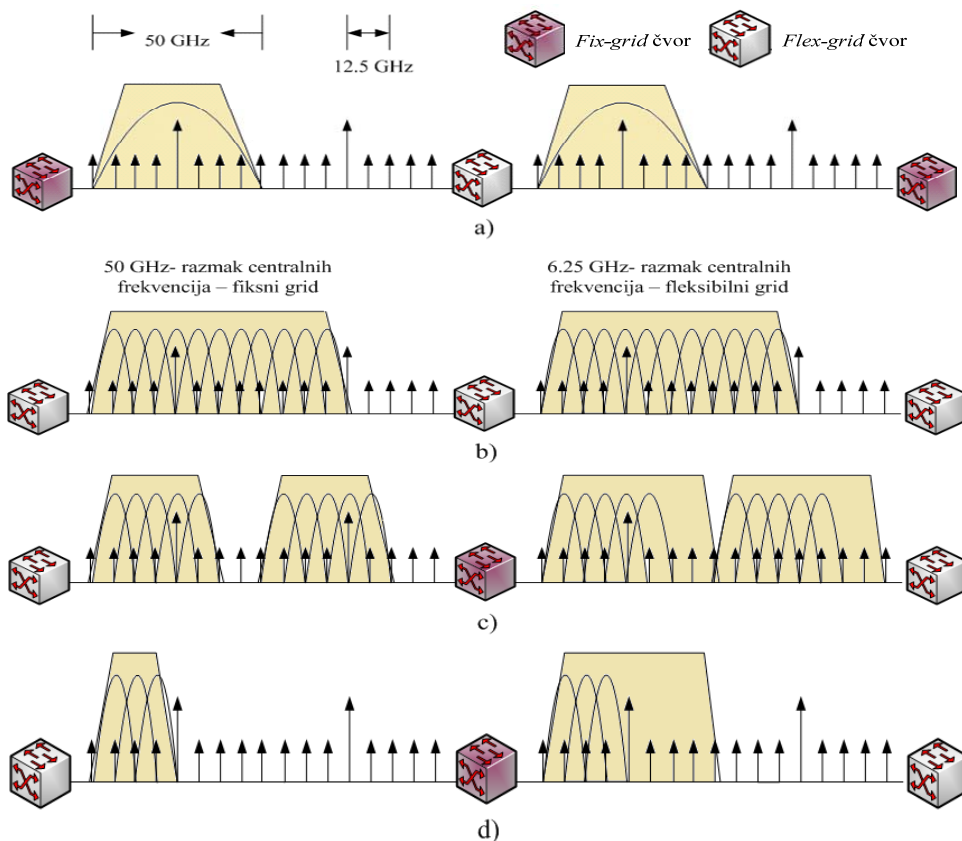
Da bi se pravazišli navedeni problemi, koristi se *shared splitting* arhitektura (prikazana na Slici 2- desno) kojom se smanjuje broj BV-WSS. Ova arhitektura se sastoji od dva glavna dela: deo za komutaciju i zajednički deo za razdvajanje/izdvajanje dela spektra signala. BV-WSS se sada nalaze u delu za razdvajanje signala umesto na svakom izlaznom portu čime se smanjuje njihov broj, a time i troškovi, i poboljšava energetska efikasnost čvora jer se signali razdvajaju po potrebi (*on demand*).

2.3. Međusobno funkcionisanje *fix* i *flex grid* čvorova

Kada se pojavi zahtev u mreži, neophodno je uspostaviti optički put između izvornog i odredišnog čvora tako što se odredi ruta i dodeli/alocira talasna

dužina/frekvencijski slot tom optičkom putu. Kao što je pomenuto, FS je deo opsega namenjen određenoj konekciji i određen je centralnom frekvencijom i širinom slota. Ako pretpostavimo da u mreži, ruta optičkog puta obuhvata i *fix* i *flex grid* čvorove tj. koegzistenciju tehnologija, mogući su sledeći scenariji za dodelu talasnih dužina (*WA*, *Wavelength Assignment*)/alokaciju opsega (*SA*, *Spectrum Allocation*):

- Kad je izvor konekcije *fix grid* čvor, u pitanju je tradicionalni problem WA. Ako je zahtev veći od 100 Gb/s moguće ga je realizovati pomoću nekoliko talasnih dužina, svaka sa kapacitetom od 100 Gb/s ili manje (Slika 1).
- Kad je izvor konekcije *flex grid* čvor javljaju se dva slučaja:
- ako ruta obuhvata *flex-grid* čvorove, u pitanju je SA problem, gde se zahtev realizuje uspostavljanjem kanala sa jednim ili više FS (super kanal).
- ako ruta obuhvata i *fix* i *flex-grid* čvorove spektar se deli, a WA i SA problem postaje složeniji, u smislu da u delu rute od *flex-grid* do *fix-grid* čvora imamo SA problem, a u delu rute od *fix-grid* do *flex-grid* čvora imamo WA problem. Ako je saobraćajni zahtev veći od 100 Gb/s, uspostavlja se nekoliko puteva svetlosti, svaki kapaciteta po 100 Gb/s.



Slika 3. Scenariji zauzetosti spektra: a) kanal kapaciteta talasne dužine (100 Gb/s), b) super kanal kapaciteta 200Gb/s, c) dva kanala od 100 Gb/s, d) potkanal od 40 Gb/s [8]

Na Slici 3 prikazana su četiri moguća scenarija spektralne iskorišćenosti u mreži sa koegzistencijom fiksnog i fleksibilnog grida. Pretpostavljeno je da u slučaju fiksnog grida širina kanala iznosi 50 GHz, a u slučaju fleksibilnog grida širina jednog FS 12.5 GHz. Takođe, pretpostavljeno je da je maksimalni kapacitet talasne dužine 100Gb/s, dok je potreban broj FS za zahtevani kapacitet optičkog kanala dat u Tabeli 1. Slika 3a prikazuje zauzetost spektra u slučaju uspostavljanja puta svetlosti kapaciteta 100 Gb/s, od izvornog *fix-grid* čvora preko tranzitnog *flex-grid* čvora. Opseg širine 50 GHz zauzima se i na *fix-grid* linku (linku koji polazi od čvora sa fiksnim gridom) i na *flex-grid* linku (link koji polazi od čvora sa fleksibilnim gridom). Slika 3b prikazuje put svetlosti kapaciteta 200 Gb/s, uspostavljenog od izvornog *flex-grid* čvora preko tranzitnog *flex-grid* čvora. Pošto je moguće uspostaviti super kanal koji se sastoji od 6 FS širine 12.5 GHz, zauzima se samo 75 GHz spektra, umesto dva kanala širine po 50 GHz u slučaju fiksnog grida. Međutim, ukoliko zahtevani kapacitet konekcije od 200 Gb/s treba ostvariti između dva *flex-grid* čvora posredstvom tranzitnog *fix-grid* čvora, kao na Slici 3c, uspostavlja se dva puta svetlosti, svaki kapaciteta po 100 Gb/s. Slika 3d prikazuje uspostavljanje konekcije kapaciteta 40 Gb/s koja polazi od *flex-grid* čvora i prolazi kroz *fix-grid* čvor. Na *flex-grid* linku, optičkom putu se dodeljuje spektar širine 25 GHz ili 2 FS, dok se na *fix-grid* linku zauzima opseg širine 50 GHz. Poređenje zauzetosti spektra za različite scenarije prikazano je u Tabeli 1.

Tabela 1. Zauzetost spektra primenom *fix-grid* i *flex-grid* tehnologije

Kanal	<i>Fix-grid</i>		<i>Flex-grid</i>	
	Spektar	Broj talasnih dužina	Spektar	Broj FS
40 Gb/s	50 GHz	1	25 GHz	2
100 Gb/s	50 GHz	1	37.5 GHz	3
200 Gb/s	100 GHz	2	75 GHz	6
400 Gb/s	200 GHz	4	125 GHz	10

3. Strategije migracije ka elastičnim optičkim mrežama

Kao što je navedeno, migracija ka konceptu fleksibilnih optičkih mreža ne može se realizovati odjednom, već mrežni operator mora postepeno da sprovodi nadogradnju *flex-grid* opremom u onom delu mreže koja prouzrokuje usko grlo. S tim u vezi, javlja se nekoliko interesantnih izazovnih pitanja:

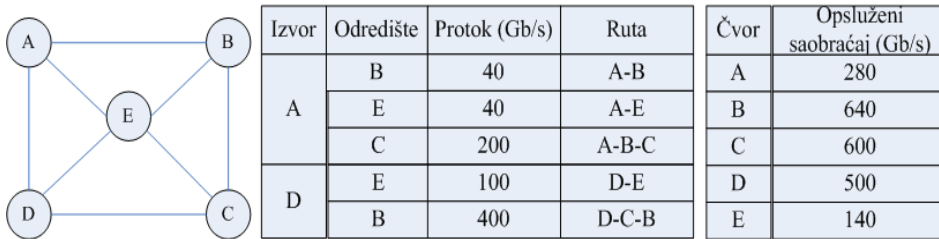
Prvo pitanje: Koji čvor prvo nadograditi kako bi podržavao fleksibilni grid? Da bi se dao odgovor na ovo pitanje, u obzir se moraju uzeti različiti faktori, kao što su topologija mreže, profil saobraćaja, opterećenost, kao i uska grla mreže. Različite strategije se mogu primeniti, kao odgovor na ovo pitanje [8]:

- Čvorove sa najvećim stepenom fizičke konektivnosti, jer povezuju najviše čvorova mreže i time pružaju različite mogućnosti inženjeringa saobraćaja (1).
- Čvorove koji generišu najveći saobraćaj, kako bi se benefit *flex-grid* tehnologije postigao za što veći saobraćaj (2).
- Čvorove koji opslužuju najveći saobraćaj - u obzir se uzima i saobraćaj koji takvi čvorovi generišu, kao i tranzitni saobraćaj kroz posmatrani čvor (3).
- Čvorove koji generišu najviše zahteva velikih kapaciteta (npr. 400 Gb/s ili 1 Tb/s). Argument za primenu ove strategije je taj što čvorovi sa fleksibilnim

gridom omogućavaju formiranje super kanala za zahteve sa velikim propusnim opsegom i na taj način efikasnije koriste spektralne resurse (4).

- Čvorove koji generišu najveći broj zahteva sa malim kapacitetima (npr. 40 Gb/s). Osnovna intuicija ove strategije leži u činjenici da primenom *flex-grid* tehnologije, saobraćajni zahtevi manjeg kapaciteta mogu biti opsluženi zauzimanjem manje širine opsega (npr. jednog ili nekoliko FS) u poređenju sa fiksnim (rigidnim) zauzimanjem propusnog opsega čitave talasne dužine (5).

Ilustracija izbora čvora na osnovu navedenih strategija prikazana je primerom na Slici 4, gde je data topologija mreže, saobraćajna matrica i opsluženi saobraćaj po svakom čvoru uzimajući u obzir i tranzitni saobraćaj. U slučaju strategije (1), prvi čvor koji treba nadograditi opremom za fleksibilni grid je čvor E, jer ima najveći stepen povezanosti. Ako se opredelimo za drugu strategiju (2), prvi čvor koji će biti nadograđen jeste čvor D, jer generiše najveću količinu saobraćaja (ukupno 500 Gb/s). Ukoliko je izabrana strategija (3), čvor B će biti prvo nadograđen, jer preko njega prelazi najviše saobraćaja, računajući i tranzitni (640 Gb/s). Ako uzmemo u obzir strategiju (4), prvi čvor za nadogradnju jeste čvor D, jer generiše najviše zahteva sa velikim propusnim opsegom (400 Gb/s). Na kraju ako se izabere strategija (5), čvor A će biti prvi koji će funkcionisati sa fleksibilnim gridom, jer generiše najviše zahteva sa manjim zahtevanim propusnim opsegom (40 Gb/s).



Slika 4. Primer topologije mreže, saobraćajne matrice i opsluženog saobraćaja po svakom čvoru

Drugo pitanje: Da li je potrebno formirati grupu čvorova koji podržavaju fleksibilni grid tzv. „flex-ostrvo“? Ukoliko se samo posmatraju prethodno navedene strategije, operator će nadograditi jedan po jedan čvor bez razmatranja uticaja već nadograđenih čvorova. Npr. ako se nadogradi čvor čiji susedni čvor već podržava fleksibilni grid, između njih je moguće realizovati tzv. super kanal odnosno uspostaviti konekciju sa velikim propusnim opsegom. U tom slučaju ova dva čvora formiraju tzv. „ostrvo“ sa fleksibilnim gridom. Pod „ostrvom“ se podrazumeva nekoliko čvorova mreže koji su povezani direktno ili preko nekoliko čvorova, a svaki od tih čvorova podržava fleksibilnost. Na ovaj način moguće je maksimizirati vrednost saobraćaja koji se opslužuje, a u zavisnosti od uslova moguće je formirati jedno ili više ostrva.

Ako se počne sa nadogradnjom čvorova, npr. prema strategiji (3), svaki sledeći čvor se bira prema (3), ali se u obzir uzimaju samo čvorovi koji su susedni onima koji su već nadograđeni. Na taj način „ostrvo“ raste sve dok se proces migracije u potpunosti ne završi. Isto tako, moguće je formirati više „ostrva“ koja se povećavaju nezavisno jedno

od drugog, jer mreža može imati nekoliko centara koji generišu veće količine saobraćaja od ostalih. Pitanje koje se takođe mora uzeti u obzir prilikom migracije jeste šta se dešava u slučaju ako operator odluči da nadogradi istovremeno više od jednog čvora mreže, što predstavlja sledeći izazovni problem pri migraciji na *flex-grid* tehnologiju.

Treće pitanje: Koliko čvorova treba nadograditi? Obzirom da je konačni cilj prelazak na potpuni koncept fleksibilnosti, nadogradnja samo određenog broja čvorova mreže može rezultovati rešavanjem uskih grla. U zavisnosti od toga šta je postavljeni cilj (npr. smanjenje verovatnoće blokiranja do ciljnih vrednosti), ali i sa aspekta strateških planova operatora mreže, bira se i optimalan broj čvorova koji se trebaju zameniti tehnologijom fleksibilnog grida, uzimajući u obzir i one koji su već nadograđeni.

Rešavanje navedenih problema je od ključnog značaja za operatore telekomunikacionih mreža pri donošenju strateških odluka vezanih za planiranje i tranziciju ka *flex-grid* mrežnim arhitekturama. Izbor najbolje (optimalne) strategije migracije biće zasnovan na maksimizaciji troškovne efikasnosti uz istovremenu minimizaciju prekida servisa zbog neophodne nadogradnje mreže.

4. Zaključak

Uvođenje elastičnosti u optički domen predstavlja logičan pravac i nastavak u razvoju današnjih optičkih transportnih mreža. U poređenju sa fiksnom dodelom opsega tj. tehnologijom fiksnog grida, fleksibilnost ima mnoštvo prednosti, kao što su bolja spektralna efikasnost, veći kapacitet, poboljšana energetska efikasnost i dr. Sasvim je izvesno da trenutni prelazak na *flex-grid* tehnologiju na nivou cele mreže neće biti ekonomski prihvatljivo rešenje obzirom na velika neophodna ulaganja u mrežnu opremu. Umesto toga, progresivna nadogradnja određenih delova mreže (kao npr. uskih grla) koja će omogućiti postepeni prelazak na tehnologiju fleksibilnog grida nameće se kao kompromisna solucija za buduće transportne mrežne arhitekture. Koegzistencija tehnologija fiksnog i fleksibilnog grida zahtevaće rešavanje različitih problema njihovog međusobnog funkcionisanja. Izbor najbolje strategije migracije podrazumevaće istovremenu optimizaciju prema više kriterijuma, uključujući tu prvenstveno benefite koji se mogu postići primenom *flex-grid* opreme, ukupne troškove implementacije nove tehnologije, kao i zahteve u pogledu kvaliteta servisa.

Literatura

- [1] *ITU-T Recommendation G.694.1*: "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid", ITU-T Geneva, 2012.
- [2] S. Miladić, G. Marković, "Elastične optičke mreže", *XXXIII Simpozijum o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – PosTel*, str. 241-251, Beograd, decembar, 2015.
- [3] 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.
- [4] S. Talebi et al., "Spectrum management techniques for elastic optical networks: A survey", *Optical Switching and Networking*, vol. 13, pp. 34-48, July 2014.

- [5] J. C. Dantas et al., „Challenges and requirements of a control plane for elastic optical networks”, *Computer Networks*, vol. 72, pp. 156-171, October 2014.
- [6] G. Shen et al., „Survivable elastic optical networks: survey and perspective (invited)“, *Photonic Network Communications*, pp. 1-17, July 2015.
- [7] F.S. Abkenar et al., „Providing quality of service (QoS) for data traffic in elastic optical networks (EONs)“, *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 41, no. 3, pp. 797-806, 2016.
- [8] 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.
- [9] P.S. Khodashenas et al., „Dynamic source aggregation of subwavelength connections in elastic optical networks“, *Photonic Network Communications*, vol. 26, pp. 131-139, 2013.

Abstract: *Adaptable features and possibilities to adjust data rates to fit specific client demands are the key advantages of elastic optical networks. Therefore, they are considered as a promising solution for efficient usage of optical network resources, since rigid fix channel spacing or fixed size spectral bandwidth leads to a poor utilization of spectrum resources what is the lack of traditional WDM technology. However, migration to some new technologies always brings some problems in the network architecture so it is necessary to provide their coexistence. The paper presents the key aspects of network architecture supporting in parallel the fixed and flexible grid technologies, interoperation between fixed grid and flexible grid nodes as well as the required node equipment to support the flex grid architecture. Migration strategies from traditional WDM to elastic optical networks are discussed in this paper together with the challenges the network operators will meet.*

Keywords: *elastic optical networks, migration strategy, coexistence*

ELASTIC OPTICAL NETWORKING – FROM RESEARCH TO IMPLEMENTATION

Goran Marković, Suzana Miladić