

# Algoritam rutiranja u translucenčnim optičkim mrežama

Vladica N. Tintor

**Sadržaj** — U ovom radu su predstavljeni glavni doprinosi algoritma rutiranja i dodele talasnih dužina u translucenčnim optičkim mrežama. Ovim algoritmom omogućena je ušteda za mrežnog operatora korišćenjem translucenčne mreže, jer je značajno smanjen broj čvorova opremljenih elektronskim regeneratorima. Korišćenjem ovih regenerators neutralizovani su svi gubici i fizička slabljenja na putanji. Takođe je izvršeno i razdvajanje korisnika na osnovu prioriteta. Rezultati su pokazali da je saobraćaj relativno izbalansiran u celoj mreži, a da je ponuđeni propusni opseg smanjen samo za određeni broj korisnika nižeg prioriteta. Ono što je najveći dobitak predloženog modela jeste da se ovim algoritmom omogućava neblokirajuća struktura mreže za transport za odabrani skup ulaznih podataka.

**Ključne reči** — Dijkstra algoritam, rutiranje i dodela talasnih dužina, translucenčne optičke mreže, verovatnoća blokade, WDM.

## I. UVOD

NOVE korisnički orjentisane telekomunikacione usluge utiču na izuzetno brzi razvoj telekomunikacija u celom svetu. Posledica ovih procesa je rast tražnje za propusnim opsegom u telekomunikacionim mrežama. Optička mreža koja je bazirana na multipleksiranju talasnih dužina (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*) se smatra vrlo obećavajućom u smislu implementacije budućih mreža za transport velikih kapaciteta. WDM optička mreža se sastoji od čvorova koji su međusobno povezani optičkim vlaknima za prenos signala po putanjama u optičkom domenu, na većem broju talasnih dužina. Čvorovi mreže za transport u stvari predstavljaju pristupnu tačku za lokalne mreže. Čvorovi su opremljeni optičkim komponentama za usmeravanje signala i elektronskim komponentama za obradu.

Budućnost ovih mreža jesu potpuno optičke mreže (*all optical networks*) u kojima se svetlosne putanje od izvorišta do odredišta u potpunosti realizuju u optičkom domenu, bez konverzije u električni domen. Trenutni tehnološki razvoj još uvek ne omogućava upotrebu ovih mreža, jer se javlja veliki broj problema pri implementaciji [1]-[7]. Ova tranzicija iz potpuno netransparentnih mreža (u kojima se vrši konverzija optičkog signala u električni i obrnuto u svakom čvoru mreže) u potpuno transparentne mreže (odnosno potpuno optičke mreže) se obavlja preko

translucenčnih mreža.

## II. TRANSLUCENTNA MREŽA

U optičkim mrežama, signali prilikom prolaska kroz čvorove mreže mogu da budu prethodno obrađeni u elektronskom formatu, ili da potpuno transparentno nastave put do odredišta. S tim u vezi postoji opšta podela na tri vrste mreža:

1. Transparentne (*transparent optical network*),
2. Netransparentne (*opaque optical network*),
3. Translucenčne (*translucent optical network*).

Za transparentnu mrežu važi da su svi čvorovi opremljeni samo komponentama za obradu signala u optičkom domenu, dok za netransparentnu mrežu važi da su svi čvorovi opremljeni komponentama za obradu signala u električnom domenu, što zahteva stalnu konverziju svih pristiglih optičkih signala. Translucenčna mreža predstavlja kombinaciju prethodne dve, gde samo određeni, unapred odabrani čvorovi imaju mogućnost obrade signala u električnom domenu, što između ostalog omogućava 3R regeneraciju (*reamplify, reshape, retime*), ali i konverziju talasne dužine u električnom domenu. Čvorovi koji nemaju tu mogućnost vrše komutaciju i konverziju u optičkom domenu, ali nisu opremljeni za regeneraciju signala. Regeneracija signala je vrlo značajna zato što prilikom transmisije signala dolazi do slabljenja koje treba nadoknaditi da bi se signal ispravno rekonstruisao na prijemu.

Translucenčne mreže se mogu podeliti u tri kategorije [1, 8]:

1. Translucenčna mreža koja se sastoji od transparentnih ostrva,
2. Translucenčna mreža sa manjim brojem čvorova sa električnom obradom signala,
3. Translucenčna mreža koja se sastoji od translucenčnih čvorova.

Translucenčna mreža može da se sastoji od nekoliko poddomena (u literaturi se koristi izraz ostrvo) sa potpunom optičkom transparentnošću, a čvorovi sa mogućnošću regeneracije se nalaze na obodu ovih ostrva [9]. Na ovaj način, unutar svakog ostrva, svetlosne putanje mogu potpuno transparentno da stignu do bilo kog drugog čvora bez regeneracije. Ali, ako signal izlazi van granica ostrva, neophodna je regeneracija koja se vrši na granici dva ostrva.

Umesto da se svičevi i elektronski procesori postavljaju samo na granicama ostrva, oni mogu da se dele među svim putanjama, što predstavlja princip mreže sa manjim brojem čvorova opremljenih elektronskim procesorskim

V. N. Tintor, Republička agencija za telekomunikacije (RATEL), Beograd, Srbija (telefon: 381-11-3210126; faks: 381-11-3232537; e-mail: [vladica.tintor@ratel.rs](mailto:vladica.tintor@ratel.rs)).

jedinicama. Odgovor na pitanje kako odabrati čvorove koji će biti opremljeni daju odgovarajući algoritmi koji uzimaju u obzir više parametara. U ovom radu izvršeno je modelovanje ove kategorije translucenčnih mreža, pri čemu je prvi deo algoritma koji će kasnije biti objašnjen posvećen optimizacionom odabiru čvorova koji treba da se opreme elektronskim regeneratorima.

Kod translucenčnih mreža definišu se i dva tipa putanja. Jedan tip su transparentne putanje, ako signal ne prolazi ni kroz jedan čvor koji ima elektronsku procesorsku jedinicu. Ako je signal u bar jednom čvoru na putanji bio regenerisan u električnom domenu, putanja kojom se prenosi optički signal se naziva translucenčnom putanjom.

Treća kategorija jeste primena hibridnih optičkih svičeva u svakom čvoru u mreži. Ovi svičevi se sastoje od standardnog optičkog kros konektora i elektronske jedinice za obradu. Svaka putanja kroz čvor može da se preusmeri u optičkom domenu ili da se prethodno regeneriše u elektronskom jezgru. Odluka da li će se izvršiti elektronska obrada zavisi od kvaliteta pristiglog signala. Ako je snaga signala nedovoljna da bi se dalje transmisija nastavila, neophodna je regeneracija, a u suprotnom slučaju signal transparentno prolazi kroz čvor. Čvorovi se u ovom slučaju nazivaju translucenčnim čvorovima, upravo zato što su za neke putanje potpuno transparentni, a za neke ne.

### III. OSNOVNI PROBLEMI

Prenos signala u optičkim mrežama je vrlo zahvalan po pitanju kapaciteta koji može da se prenese. Ali, i dalje postoje određeni tehnički, regulatorni i ekonomski izazovi za njihovu potpunu eksploataciju. Tehnički izazovi se pre svega odnose na uspešnu obradu signala u optičkom domenu tokom njegovog prenosa. Naime, i dalje je tehnički vrlo teško izvršiti zadržavanje signala i njegovu obradu u optičkom domenu. U regulatornom smislu, trenutne polemike se najviše odnose na to kako omogućiti uključivanje svih infrastrukturnih mreža u okviru funkcionalnih sistema u tržište telekomunikacija, i kako u uslovima dozvoljenog pristupa lokalnoj petlji ohrabriti dalju gradnju optike do domaćinstava. A u ekonomskom pogledu, cene opreme i instaliranja su trenutno visoke, tako da povraćaj uložene investicije nije dovoljno kratak.

Prvi i osnovni problem koji se javlja u tranziciji iz potpuno netransparentnih mreža u potpuno transparentne mreže jeste slabljenje signala. Ovo se odnosi i na slabljenja koja se javljaju usled velikih rastojanja koje signal prelazi u mrežama za transport, ali i slabljenja koje unose optičke komponente koje su kaskadno raspoređene duž putanje. Tu su i druge pojave koje utiču na kvalitet signala: optički šum, hromatska disperzija, polarizaciona disperzija, nelinearni efekti i preslušavanja. Kada se sve ovo uzme u obzir, u optičkim mrežama postoji ograničenje maksimalnog dometa optičkog signala. Da bi se ova granica prevazišla, neophodna je regeneracija signala koja će pojačati, uobličiti i sinhronizovati optički signal (u literaturi se uobičajeno koristi izraz 3R regeneracija). Regeneracija omogućava da svetlosni signal ima mnogo veći domet. Ona može da se realizuje u potpunosti u

optičkom domenu, ali regeneracija u električnom domenu je trenutno mnogo isplativija i pouzdanija [1]. Regeneracija u električnom domenu podrazumeva da se degradiran optički signal prvo konvertuje u električni domen, obradi i regeneriše, i potom konvertuje nazad u optički domen i prosledi dalje u sistem. Ali, sa druge strane, upotreba konvertora u sistemu može značajno da optereti budžet, ali i da uspori sistem, jer su u praksi električni procesori znatno sporiji od brzine nosioca optičkog signala u WDM mrežama [11].

Drugi problem koji je vezan za optičke mreže tiče se algoritma rutiranja i dodele talasnih dužina (RWA - *routing and wavelength assignment*). RWA algoritam se sastoji od dva dela: algoritma rutiranja i algoritma za dodelu talasnih dužina. Svetlosna putanja će se u ovim mrežama formirati između izvorišnog i odredišnog čvora ako i samo ako postoji slobodna ruta i slobodna talasna dužina. Oba uslova moraju biti ispunjena da bi se signal uspešno preneo. U suprotnom, ako ne postoje i slobodna putanja i slobodna talasna dužina unutar linka, signal neće biti prenet. Zbog toga je veoma važno razviti brz i efikasan RWA algoritam koji će biti implementiran uzimajući u obzir i optimalnu iskorišćenost resursa mreže. Drugim rečima, odabir putanje treba da bude takav da saobraćaj u mreži bude izbalansiran i raspodeljen po svim putanjama podjednako.

Treći problem u implementaciji optičkih mreža se odnosi na najvažniji parametar kvaliteta servisa u mreži, a to je verovatnoća blokade. Naime, kada je opterećenje u mreži veliko, broj blokiranih sesija značajno raste. U praksi se pokazalo da su određeni linkovi znatno opterećeniji od drugih i da se blokada javlja usled zagušenja na njima. Da bi se izvršila prevencija ovog slučaja, neophodno je pronaći alternativne putanje kojima će se preneti signali, i time smanjiti verovatnoću blokade [10].

Međutim, čak ako ni ova mogućnost ne reši problem, moguće je još jedno rešenje. Ono se sastoji u tome da se svi čvorovi podele u dve ili više grupa zavisno od prioriteta. Ona lokalna mreža koja ima viši prioritet će imati prednost u postupku pronalaska optimalne putanje za optički signal u odnosu na neku drugu lokalnu mrežu koja je nižeg prioriteta. Sav saobraćaj za koji nisu pronađeni resursi korišćenjem algoritma za rutiranje i dodelu talasnih dužina se multipleksira nekom od SONET/SDH tehnologija naredne generacije [12, 13]. Na ovaj način verovatnoća blokade će biti značajno manja. Mana ovog rešenja jeste da će nekim čvorovima nižeg prioriteta biti ponuđen propusni opseg manji od zahtevanog, ali sa druge strane zahtev neće biti odbijen usled nepostojanja resursa.

### IV. PREGLED LITERATURE

Referenca [8] daje osnovni koncept o translucenčnoj mreži, dok se detaljnija analiza translucenčne mreže sa manjim brojem čvorova sa električnim procesiranjem signala obrađuje u referencama [3, 14]. Analiza translucenčne mreže koja se sastoji od transparentnih ostrva je data u [9, 15], a analiza translucenčne mreže koja se sastoji od translucenčnih čvorova je data u [7]. Potpuno

transparentne mreže se proučavaju u referenci [16]. Razlike između transparentne, netransparentne i translucetne mreže su obrađene u [6]. Pitanje komutacije paketa u optičkim mrežama je analizirano u [17].

Veći broj heuristika za dodelu talasnih dužina je obrađen u [18, 19], a osnovni tipovi rutiranja u [18, 20, 21, 22]. Referenca [23] razmatra nekoliko tehnika za rutiranje i dodelu talasnih dužina u optičkim WDM mrežama, ali bez konverzije talasnih dužina. U referenci [24] je predstavljen algoritam rutiranja i dodele talasnih dužina koji pri proračunu putanje razmatra svaki link zasebno, ali u ovom modelu nije razmatrano pitanje degradacije signala u sistemu i multipleksiranja saobraćaja, za razliku od modela razvijenog u [10]. Pitanje algoritma rutiranja i dodele talasnih dužina bazirano na broju međučvorova na putanji se analizira u referenci [11], ali samo za slučaj potpuno transparentne optičke mreže, dok se predloženi model-algoritam iz ovog rada primenjuje na translucetnu optičku strukturu. Dodela talasne dužine kojom se smanjuje verovatnoća blokade u WDM mreži koja koristi konvertore talasnih dužina sa ograničenim mogućnostima se analizira u [25]. Poboljšanje performansi se obezbeđuje dodelom različitih talasnih dužina različitim zahtevima. Tehnika raspodele čvorova u mreži koji imaju mogućnost regeneracije signala se razmatra u [3, 5]. Referenca [1] pruža sveobuhvatan uvid u trenutni teorijski i eksperimentalni razvoj optičke mreže koja ima ograničen broj čvorova za regeneraciju signala.

Prvi deo algoritma, koji obuhvata odabir čvorova koji imaju u sebi regeneratore za signale oslabljene pri prenosu kroz mrežu i koji sadrži kriterijume fizičkog ograničenja za odabir putanje, ali i podatke o trenutnoj raspoloživosti resursa u mreži, poređen je sa tri delimično slična algoritma iz literature. Ta tri modela su: model koji koristi samo fizička ograničenja u mreži [4], model koji bira one čvorove koji imaju najveće opterećenje u mreži tako što broji koliko putanja prolazi kroz neki čvor, i onaj čvor koji ima najviše putanja se kandiduje da se u njemu regeneriše signal [3], i model koji bira one čvorove koji imaju viši stepen čvora, definisan kao broj linkova koji su priključeni na taj čvor [2]. Drugi deo algoritma razvijenog u ovom radu koji se odnosi na dodelu talasnih dužina po većem broju kriterijuma je potpuno originalan. Oba dela algoritma deo su jedinstvenog modela-algoritma za optimizaciju i upravljanje složenom translucetnom optičkom mrežom.

## V. OSNOVNI KRITERIJUMI ZA ALGORITME

Izbor konkretne putanje u optičkim mrežama za transport može da se vrši po većem broju kriterijuma, kao što su fizički najkraća putanja, putanja koja prolazi kroz najmanji broj čvorova, putanja koja zauzima najmanje resursa, putanja koja je najjeftinija, itd. Međutim, javlja se potreba da više kriterijuma bude zadovoljeno u isto vreme. Prvo, ovo je važno sa stanovišta krajnjeg korisnika, jer njegov interes jeste da kvalitet servisa bude visok, a cena niska. Sa druge strane, interes operatora jeste da kapacitet mreže bude što veći, trošak mreže što manji, a resursi

mreže maksimalno iskorišćeni. Takođe, sa stanovišta optimizacije rada same mreže interes je mogućnost brzog i kvalitetnog povezivanja bilo koje dve tačke. Dakle, nije cilj da se posmatra svaki od kriterijuma pojedinačno, već se zahteva da se svi oni objedine unutar jedinstvenog algoritma.

Pre svega, osnovni uslov jeste da slabljenje signala ne bude veće od praga prijema, odnosno da primljeni signal može uspešno da se rekonstruiše u prijemniku. Sledeći uslov jeste da investicija u samu mrežu bude takva da operatori budu zainteresovani za gradnju novih i unapređenje postojećih mreža za transport. Jedan od načina da se smanje troškovi jeste da se iz određenog broja čvorova izuzme oprema koja vrši regeneraciju signala u električnom domenu, i za to su se najbolje pokazale translucetne mreže.

U praksi se pokazalo da su pri prenosu signala u telekomunikacionoj mreži neki od linkova uglavnom znatno više opterećeni od ostalih. Posledica ove pojave je niži kvalitet servisa, jer se u mreži stvaraju uska grla koja ne dozvoljavaju uspostavu veze. Ovo se može prevazići tako što bi se kao kriterijum tokom procesa traženja adekvatne putanje koristila informacija o trenutnoj zauzetosti optičkog vlakna. Prema tome, ono vlakno čiji su resursi u velikoj meri rezervisani imalo bi veći težinski faktor. Drugim rečima, još jedan uslov koji je postavljen jeste da saobraćaj u mreži bude balansiran tako da svi resursi u mreži budu podjednako opterećeni. Čvorovi mreže za transport predstavljaju pristupnu tačku lokalnih telekomunikacionih mreža. Međutim, veličina i značaj tih lokalnih mreža svakako nisu isti. U tom smislu se i postavlja uslov za uspostavljanje prioriteta između čvorova, i za one čvorove koji imaju veći prioritet neophodno je garantovati visok kvalitet servisa. Ovaj uslov bi se ispunio tako što bi se prilikom rešavanja zahteva za sesijama prvo razmatrali oni koji potiču od prioritetnijih čvorova, a tek kasnije ostali zahtevi.

I na kraju preostaje najvažniji uslov, a to je kvalitet servisa. Osnovna ideja kojom se rukovodilo pri izradi modela za rutiranje i dodelu talasnih dužina kroz optičku mrežu jeste da se pronađe odgovarajuća putanja za svaku sesiju bez mogućnosti blokade. Od posebnog je interesa da se pronađe putanja za sesije sa većim prioritetom, što se obezbeđuje tako što se, za slučaj da neka od putanja nema slobodne resurse, pronalazi alternativna putanja. Ako se dogodi da se kod nekih manje prioriternih sesija ne pronađe ni alternativna putanja, predviđeno je da se ta sesija multipleksira zajedno sa ostalim sesijama koje koriste istu putanju, ili iste deonice na putanji. Na ovaj način se kvalitet ponuđenog servisa za te sesije smanjuje, jer se raspoloživi kapacitet po talasnoj dužini deli na više sesija, ali se izbegava situacija da odgovor na zahtev za uspostavljanje konekcije između dva čvora bude negativan.

Da bi se realizovali postavljeni uslovi predložen je algoritam iz dva koraka. U prvom koraku bi se realizovao algoritam rutiranja i pronalaska regenerativnih čvorova, a u drugom algoritam rutiranja i dodele talasnih dužina. Prvim korakom se karakteristike mreže definišu tako da se

zadovolje tri uslova: da mreža bude ekonomična, da slabljenje na putanji bude dovoljno malo da rekonstrukcija signala bude izvodljiva i da bude zastupljeno balansiranje saobraćaja. Dakle, ovim algoritmom se od svih čvorova u mreži, prema kriterijumu fizičke dužine linkova i trenutne zauzetosti optičkih vlakana, biraju samo oni koji su neophodni da bi se signal sa dovoljnom snagom preneo do odredišta i u njima se lociraju regeneratori. Rezultati predloženog algoritma rutiranja i pronalaženja regenerativnih čvorova su ponudili efikasnije iskorišćenje resursa u odnosu na dosadašnja istraživanja, i ti rezultati su publikovani u referenci [26].

Drugi korak bi se realizovao kroz primenu rezultata gorenavedenog koraka, a uz dodatne algoritamske procedure kojima bi se obezbedila preostala dva uslova, da se korisnici podele po prioritetu i da se formira neblokirajuća struktura. Ovo se obezbeđuje kroz algoritam rutiranja i dodele talasnih dužina. Naime, prvo se za čvorove koji imaju najveći prioritet rezervišu putanje i pronadu odgovarajuće talasne dužine na tim putanjama, a potom se prelazi na preostale putanje. Ukoliko za one sesije koje su nižeg prioriteta nema slobodne putanje, pronalazi se alternativna tako što se iz proračuna izbaci link koji je potpuno zauzet, i ponovo se pokreće isti algoritam, samo što sada mreža ima jedan link manje. Ako se ni tada ne dobije pozitivan rezultat, iz mreže se izbacuje sledeći zauzeti link i tako redom. U slučaju da ova procedura ne pronađe slobodnu putanju, saobraćaj tih sesija se multipleksira. To se radi sa ciljem da za određeni skup ulaznih parametara verovatnoća blokade bude jednaka nuli.

Autor ovog rada nije pronašao u literaturi algoritam za rutiranje i dodelu talasne dužine koji istovremeno uzima u obzir sve prethodno pomenute uslove, tako da nije bilo moguće izvršiti komparaciju dobijenih rezultata sa nekim drugim algoritmom. Zbog toga je odlučeno da se algoritam primeni na više vrsta optičkih mreža (transparentna, translucetna, netransparentna) i na taj način se uporede dobijeni rezultati. Koliko je autoru poznato, ovo je prvi i samim tim potpuno originalni rad koji vrši optimizaciju resursa u optičkim mrežama za transport tako što istovremeno zadovoljava sledeći niz kriterijuma:

- kompenzovanje fizičkih ograničenja i slabljenja u mreži tako da signal može uspešno da se rekonstruiše na prijemu,
- ekonomičnost (manje troškova),
- ravnomerno balansiranje saobraćaja po mreži,
- izuzetno malu verovatnoću blokade sesije optičkog kanala,
- diferenciranje saobraćaja u mreži zavisno od prioriteta.

Prvenstvena namena razvijenog algoritma je da se primeni na translucetne optičke mreže, a testiranja su vršena na nekoliko često korišćenih topologija optičkih mreža za transport [2, 3, 23].

## VI. GLAVNI REZULTATI

Da bi se odabrao adekvatan algoritam rutiranja između dva posmatrana čvora, korišćen je distribuirani Dijkstra algoritam. U ovom radu kao težinski faktor linkova uzete su vrednosti slabljenja signala i trenutne zauzetost vlakana sa postojećim saobraćajem. Slabljenje signala se određuje na osnovu fizičkih rastojanja optičkih vlakana i broja međučvorova na putanji. Cilj jeste da se pronađe ona putanja koja će najkraćim rastojanjem i uz najmanji broj međučvorova spojiti dva čvora, ali tako da resursi u mreži budu racionalno iskorišćeni. Ako bi se uzeo samo kriterijum najkraćeg rastojanja, desio bi se slučaj da se pronađe najkraća putanja, ali koju nije moguće realizovati jer su sve talasne dužine zauzete za neke druge sesije u mreži.

U cilju efikasnog korišćenja svih raspoloživih resursa u telekomunikacionoj mreži, kao dodatni parametar u proračunu optimalne putanje uzima se broj zauzetih talasnih dužina u optičkom vlaknu. Prema tome, težinski faktor linka između čvorova  $(i,j)$  u trenutku  $t$  se izračunava po sledećem obrascu:

$$d_{ij}(t) = (1 + a_{ij}(t)/W)l_{ij} \quad (1)$$

gde je  $a_{ij}(t)$  trenutni broj zauzetih talasnih dužina na linku  $(i,j)$  u trenutku  $t$ , pri čemu važi  $a_{ij}(t) \leq W$ ,  $l_{ij}$  je fizička dužina linka  $(i,j)$ , a  $W$  je ukupan broj talasnih dužina. Pretpostavlja se da je broj talasnih dužina na svakom linku isti.

Algoritam rutiranja treba da bude takav da za definisani težinski faktor linka pronađe putanju koja je najkraća. Pri tome, sve vreme treba imati u vidu da se cena stalno menja tokom vremena, i da informacije treba stalno da kruže kroz mrežu. Ali, na ovaj način se bira ona putanja koja je fizički najkraća, ako postoji dovoljno resursa u mreži u tom trenutku. Ako to ne važi, bira se nešto duža putanja korišćenjem linkova koji u tom trenutku nisu opterećeni i mogu da realizuju transfer zahtevanog saobraćaja. Dakle, vrši se balansiranje saobraćaja u celoj mreži.

Prvi deo algoritma se odnosi na odabir čvorova koji imaju u sebi regeneratore za signale koji su oslabljeni pri prenosu kroz mrežu. Ovaj deo algoritma u sebi obuhvata kriterijume fizičkog ograničenja za odabir putanje, ali i trenutnu raspoloživost resursa u mreži. Broj ovih čvorova treba da bude što je moguće manji, da bi realizacija bila jeftinija, ali oni treba da budu adekvatno raspoređeni da bi se mogao regenerisati signal.

Cilj je da se za svaki zahtev za optički kanal između izvorišnog čvora  $s$  i odredišnog čvora  $d$  uspostavi svetlosna putanja. Svetlosna putanja može se definisati kao skup potputanja od kojih svaka potputanja koristi jednu istu talasnu dužinu, i za koju važe sledeća ograničenja [24]:

- a) Uslov kontinuiteta talasne dužine – neophodna rezervacija jedne iste talasne dužine na celoj putanji optičkog kanala između izvorišta i odredišta.
- b) Uslov kapaciteta optičkog vlakna – broj svetlosnih putanja koje koriste isto optičko vlakno ne sme

da bude veći od broja talasnih dužina u tom vlaknu.

- c) Uslov broja međučvorova – broj međučvorova na putanji ne sme da bude veći od unapred definisanog parametra  $Lhop$ .
- d) Uslov maksimalne dužine – ukupna fizička dužina svetlosne putanje izražena u kilometrima ne sme biti veća od unapred definisanog parametra  $Llen$ .

Prethodno definisanu svetlosnu putanju treba pronaći u translucennoj optičkoj mreži. Odabir čvorova sa regenerativnim mogućnostima se vrši na sledeći način. Za neku putanju između čvorova  $(s,d)$  za koju važi da je njena dužina veća od  $Llen$  i/ili je broj međučvorova na njoj veći od  $Lhop$  pronalazi se čvor  $K$  koji ima sledeće karakteristike: nalazi se u centru putanje i ima najveći broj putanja koji prolaze kroz njega (ovo zahteva određen broj iteracija da bi se dobio optimalan čvor  $K$ ). Iz skupa svih čvorova biraju se oni koji zadovolje gorenavedene zahteve. Ideja je da se iskoriste dobijeni rezultati i da se dodatnim procedurama u drugom delu algoritma obezbedi neblokirajuća struktura optičkih telekomunikacionih mreža za transport.

Na ovaj način struktura translucenčne mreže je data unapred, u smislu broja i rasporeda čvorova u mreži koji imaju električnu opremu sa 3R regenerativnim, kao rezultat algoritma rutiranja i pronalaženja regenerativnih čvorova. Tako se dobija optička mreža sa odgovarajućim brojem čvorova sa mogućnošću konverzije talasne dužine, i sa putanjama između bilo koja dva čvora [26]. Ove putanje su rezultat najkraćih putanja u mreži, ali i trenutne zauzetosti resursa.

U drugom delu algoritma koji obuhvata rutiranje i dodelu talasnih dužina korišćena je kombinacija dve heuristike za odabir svetlosne putanje, i to prve po redu talasne dužine i rezervacije talasnih dužina [18]. Algoritam je sledeći:

Proverava se svaka talasna dužina od  $\lambda_1$  do  $\lambda_w$ , i ako su ispunjeni uslovi:

- $\lambda_i$  ( $1 \leq i \leq W$ ) je slobodna duž cele putanje,
- ukupna dužina putanje je kraća od  $Llen$ ,
- broj međučvorova je manji od  $Lhop$ , i
- posmatrana putanja nije rezervisana za neku drugu putanju većeg prioriteta,

$\lambda_i$  se dodeljuje posmatranoj putanji. Ako neki od prethodno navedenih uslova nije ispunjen, traži se druga alternativna putanja pomoću algoritma rutiranja.

Ako nema putanje između dva čvora, vrši se povratak na početnu putanju i posmatra se da li izvorišni i odredišni čvorovi imaju mogućnost regeneracije i konverzije. Ako imaju, optički kanal se optički multipleksira zajedno sa drugim signalima preko iste talasne dužine. Drugi signali u stvari predstavljaju druge optičke kanale za koje takođe nije pronađena putanja, a cela ruta ili deo rute prolazi preko posmatrane putanje. Multipleksiranjem ovih kanala

smanjuje se ponudeni propusni opseg u odnosu na ono što su ti kanali zahtevali prilikom slanja zahteva za konekciju između izvorišta i odredišta, ali sa druge strane njihov zahtev nije odbijen. Dakle, smanjuje se ponudeni protok po korisniku, ali verovatnoća blokade se zadržava na niskom nivou. Svi čvorovi su podeljeni u odgovarajuće grupe zavisno od prioriteta. Multipleksiranje se vrši samo za saobraćaj koji ima manji prioritet. Na ovaj način se dobija neblokirajuća translucenčna mreža, čije performanse po pitanju verovatnoće blokade su demonstrirane na slikama 1 i 2. Modelovanje je iskorišćeno za komparaciju četiri tipa mreže:

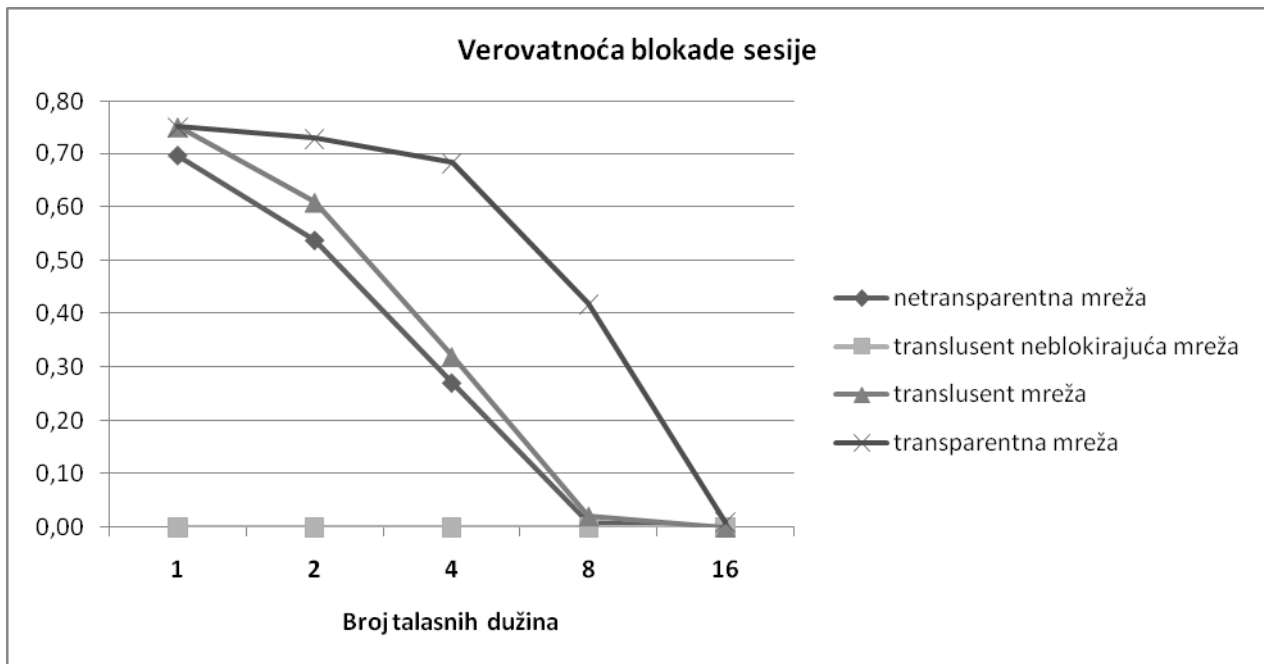
1. Potpuno transparentna optička mreža u kojoj nijedan čvor nema mogućnost 3R regeneracije.
2. Translucenčna optička mreža koja se dobija kao rezultat algoritma rutiranja i pronalaženja regenerativnih čvorova.
3. Translucenčna neblokirajuća optička mreža koja se dobija kao rezultat algoritma rutiranja i dodele talasnih dužina.
4. Potpuno netransparentna optička mreža u kojoj svi čvorovi imaju mogućnost 3R regeneracije.

Na Slici 1. je prikazana verovatnoća blokade sesije za sva četiri prethodno navedena tipa konfiguracije mreže u zavisnosti od broja talasnih dužina za mrežu manje veličine sa 14 čvorova i 21 linkom. Može se primetiti da najbolje performanse pokazuje neblokirajuća translucenčna mreža koja nema nijednu blokiranu sesiju, dok ostali tipovi mreže dostižu zanemarljivo malu verovatnoću blokade tek za vrednost  $W = 8$ . Ovakav rezultat je posledica toga što se traže i alternativne putanje, a ako ni tada nema slobodnih resursasesije se multipleksiraju.

U Tabeli 1. je naveden broj čvorova sa elektronskim regenerativnim za mrežu sa 24 čvorova i 43 linka. Za veće vrednosti parametra  $W$  postoji određena ušteda u potrebi za opremanjem mreže dodatnom elektronskom opremom za konverziju i procesiranje signala. Za vrednost  $W = 64$  čak 70% čvorova translucenčne neblokirajuće mreže mogu da budu potpuno transparentni za signale u optičkom domenu .

TABELA 1: BROJ ČVOROVA SA MOGUĆNOŠĆU 3R KONVERZIJE,  $Llen = 3000$  km,  $Lhop = 3$ .

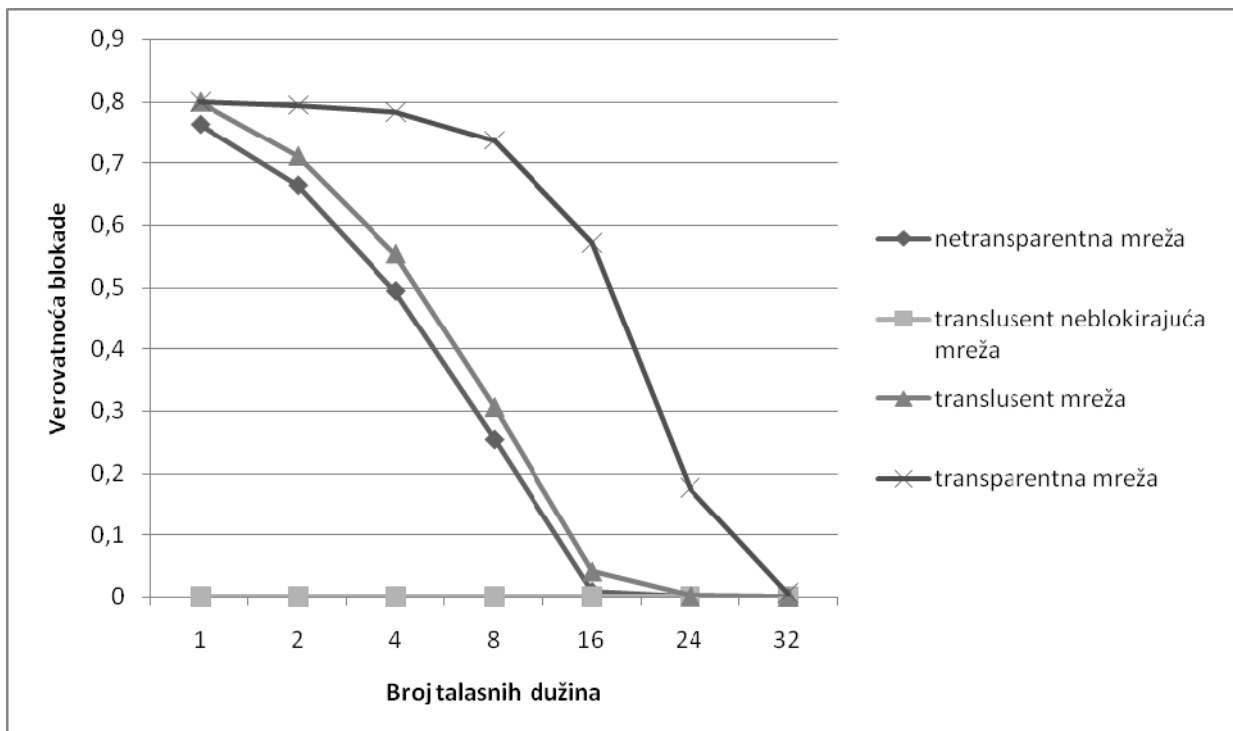
$w$	<i>netransparentna</i>	<i>translucenčna neblokirajuća</i>	<i>translucenčna</i>	<i>transparentna</i>
1	24	24	13	0
16	24	21	10	0
24	24	19	10	0
32	24	16	10	0
64	24	7	7	0
128	24	6	6	0



Sl. 1. Verovatnoća blokade sesije za mrežu sa 14 čvorova i 21 linkom u funkciji broja talasnih dužina.  $L_{len} = 3000$  km,  $L_{hop} = 3$ , srednja vrednost broja zahtevanih sesija je 85.

Na Slici 2. je prikazana verovatnoća blokade sesije za sva četiri tipa konfiguracije mreže u zavisnosti od broja talasnih dužina za mrežu srednje veličine sa 24 čvorova i 43 linka. Može se primetiti da najbolje performanse opet

pokazuje neblokirajuća translucentna mreža koja nema nijednu blokiranu sesiju, dok ostali tipovi mreže dostižu zanemarljivo malu verovatnoću blokade tek pri vrednostima od  $W = 24$ .



Sl. 2. Verovatnoća blokade sesije za mrežu sa 24 čvorova i 43 linka u funkciji broja talasnih dužina.  $L_{len} = 3000$  km,  $L_{hop} = 3$ , srednja vrednost broja zahtevanih sesija je 255.

Najvažniji cilj projektovanja telekomunikacione mreže je da na svaki zahtev (ili bar na veliku većinu zahteva) za uspostavljanje veze odgovor bude pozitivan, odnosno da se pronade putanja koja je slobodna i koja može da ponudi dobar kvalitet servisa. Kod optičkih mreža ovaj zahtev je dodatno iskomplikovan činjenicom da u optičkom domenu

nije moguće zadržati signal i izvršiti njegovu obradu. Ali, upotreba konvertora talasne dužine i *add-drop* multipleksera omogućava određeni nivo manipulacije nad optičkim signalom. A kao krajnja metoda uvek preostaje mogućnost konverzije signala u električni domen i njegova dalja obrada. Predloženi algoritam minimizira

broj ovih konverzija, uz održavanje maksimalnog mogućeg kvaliteta i što duže zadržavanje signala u optičkom domenu (sa konačnim ciljem da signal sve vreme transmisije između dve tačke bude isključivo u optičkom domenu). To je kompromis sa kojim se svi projektanti optičkih mreža još uvek sreću. Ono što je omogućeno predloženim algoritmom rutiranja i dodele talasnih dužina u translucentnim optičkim mrežama jeste da se formira neblokirajuća struktura, odnosno da se za određeni opseg ulaznih veličina na svaki zahtev za uspostavljanje sesije odgovori pozitivno, i to je svakako najveći doprinos ovog naučnog rada, što je i prikazano na Slikama 1 i 2.

## VII. BUDUĆI PRAVCI ISTRAŽIVANJA

Dodatna poboljšanja predloženog algoritma mogu se ostvariti kroz smanjenje kompleksnosti koje bi se ogledalo kroz relativno kraće vreme kalkulacije postavljenih jednačina, naročito za mreže sa velikim brojem čvorova. Na ovaj način bi se sa statičkog upravljanja optičkom mrežom za transport moglo preći na dinamičko upravljanje, gde bi se na svaki novi zahtev za sesijom promptno reagovalo u smislu pronalaženja optimalne putanje kroz mrežu. Drugo poboljšanje bi se odnosilo na matematičku potvrdu da su dobijena rešenja zaista optimalna. Zbog toga budući pravac istraživanja ide u smeru kreiranja modela linearnog programiranja kojim se omogućava dobijanje optimalnih rešenja po celom skupu izabranih parametara, ali i ubrzanje celog procesa.

Prvo bi se postavio sistem linearnih jednačina kojima se definišu uslovi za rutiranje i dodelu talasnih dužina u optičkim mrežama za transport. Pored ograničenja koja postoje za uspostavljanje svetlosne putanje ti uslovi mogu obuhvatiti i različite karakteristike čvorova po pitanju mogućnosti regeneracije signala u električnom domenu. Neki od sistema jednačina se nalaze u literaturi [21, 23] i [27]-[31]. Razvijanjem heuristike u JAVA programskom jeziku koja bi bila povezana sa trenutno najboljim softverom za linearno programiranje, paketom CPLEX, dobijala bi se optimalna rešenja za postavljeni linearni problem. Ali, kako je rešavanje sistema jednačina u paketu CPLEX vrlo zahtevno po pitanju radne memorije i vremena rešavanja, upotreba neke od heuristika za relaksaciju i ubrzanje rešavanja sistema jednačina je nešto što se nameće kao prihvatljiva solucija. Ukoliko bi se na manje zahtevnim mrežama dokazalo da heuristike daju rezultate približne onima koje daje CPLEX model za rešavanje sistema linearnih jednačina, to bi značilo one i na većim i zahtevnijim mrežama mogu da daju rezultate čija upotreba bi pružala visoku tačnost.

Na kraju treba naglasiti da je modelovanje algoritma rađeno na osnovu većeg broja različitih verovatnoća pojavljivanja zahteva za sesijom unutar optičke mreže. Ali, da bi ovaj model realno izvršio simulaciju stvarnih mreža, neophodno je upotrebiti podatke o saobraćaju iz neke od realnih mreža za transport, čime bi se dobila potvrda o simulacionom modelu koji može biti upotrebljen za optimizaciono rutiranje i dodelu talasnih dužina u optičkim mrežama za transport. To će svakako

predstavljati osnovu za dalje istraživanje optimizacionog modela optičkih mreža za transport.

## LITERATURA

- [1] G. Shen and R. S. Tucker, "Translucent Optical Networks: The Way Forward", *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 2, pp. 48-54, February 2007.
- [2] X. Yang and B. Ramamurthy, "Sparse Regeneration in Translucent Wavelength-Routed Optical Networks: Architecture, Network Design and Wavelength Routing," *Photonic Network Communications*, vol. 10, no. 1, pp. 39-53. January 2005.
- [3] G. Shen, W. Grover, T. Cheng and Sanjay Bose, "Sparse placement of electronic switching nodes for low blocking in translucent optical networks", *Journal of Optical Networking*, vol. 1, issue 12, pp. 424-441, December 2002.
- [4] Y. Peng, W. Hu, W. Sun, X. Wang and Y. Jin, "Impairment constraint multicasting in translucent WDM networks: architecture, network design and multicasting routing", *Photonic Network Communications*, vol. 13, no. 1, pp. 93-102. January 2007.
- [5] Y. Ye, T. Hiang Cheng and C. Lu, "Routing and wavelength assignment algorithms for translucent optical networks", *Optics Communications*, vol. 229, issue 1-6, pp. 233-239, January 2004.
- [6] B. Ramamurthy, D. Datta, H. Feng, J. P. Heritage and B. Mukherjee, "Transparent vs. opaque vs. translucent wavelength-routed optical networks," in *Optical Fiber Communication Conference*, vol. 26 of OSA Proceedings Series, pp. 59-61, 1999.
- [7] B. Ramamurthy, S. Yaragorla and X. Yang, "Translucent optical WDM networks for the next-generation backbone networks", in *Proceedings of IEEE GLOBECOM*, vol. 1, pp. 60-64, San Antonio, TX, Nov. 2001.
- [8] Gagnaire, Maurice, Kuri, Josue, Koubaa and Mohamed, *Network Planning and Traffic Engineering Translucent Optical WDM Networks*, Springer, 2008.
- [9] X. Yang and B. Ramamurthy, "Interdomain dynamic wavelength routing in the next-generation translucent optical Internet", *Journal of Optical Networking*, vol. 3, no. 3, pp. 169-187, March 2004.
- [10] V. Tintor, "Algoritam za optimizaciju resursa u optičkim mrežama za transport", doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2009.
- [11] R. Dante, E. Moschim and J. Martins-Filho, "Modified distributed relative capacity loss algorithm for WDM optical networks", *Journal of Optical Networking*, vol. 4, issue 5, pp. 271-284, 2005.
- [12] H. Helvoort, *Next Generation SDH/SONET: Evolution or Revolution*, John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [13] S. V. Kartalopoulos, *Next Generation SONET/SDH: Voice and Data*, Wiley-IEEE Press, 2004.
- [14] A. Glenstrup, "Optimized Design and Analysis of all-optical networks", Ph.D. dissertation, Technical University of Denmark, May 2002.
- [15] E. Karasan and M. Arisoylu, "Design of Translucent Optical Networks: Partitioning and Restoration", *Photonic Network Communications*, vol. 8, no. 2, pp. 209-221, September 2004.
- [16] P. V. Holm-Nielsen, "A study on optical labeling techniques for all-optical networks", PhD thesis, Technical University of Denmark, April, 2005.
- [17] V. Tintor, P. Matavulj, J. Radunović, "Analysis of blocking probability in optical burst switched networks", *Photonic Network Communications*, vol. 15, no. 3, pp. 227-236. June 2008.
- [18] B. Mukherjee, *Optical WDM Networks*, Springer, 2006.
- [19] J. Simmons, *Optical Network Design and Planning*, Springer, 2008.
- [20] E. Bouillet, G. Ellinas, J. Labourdette and R. Ramamurthy, *Path Routing in Mesh Optical Networks*, John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [21] M. Pioro and D. Medhi, *Routing, Flow, and Capacity Design in Communication and Computer Networks*, Morgan Kaufmann, 2004.
- [22] S. Bandyopadhyay, *Dissemination of Information in Optical Networks: From Technology to Algorithms*, Springer, 2008.

- [23] P. Singh, A. K. Sharma and S. Rani, "Routing and wavelength assignment strategies in optical networks", *Optical Fiber Technology*, vol. 13, issue 3, pp. 191-197, July 2007.
- [24] B. Jaumard, C. Meyer and X. Yu, "How much wavelength conversion allows a reduction in the blocking rate?", *Journal of Optical Networking*, vol. 5, issue 12, pp. 881-900, 2006.
- [25] S. Shimizu, Y. Arakawa and N. Yamanaka, "Wavelength assignment scheme for WDM networks with limited-range wavelength converters", *Journal of Optical Networking*, vol. 5, issue 5, pp. 410-421, 2006.
- [26] V. Tintor and J. Radunović, "Distributed Dijkstra Sparse Placement Routing Algorithm for Translucent Optical Networks", *Photonic Network Communications*, vol. 18, no. 1, pp. 55-64, August 2009.
- [27] Y. Ye, T. Chai, T. Cheng and C. Lu, "Algorithms for the design of WDM translucent optical networks", *Optics Express*, vol. 11, issue 22, pp. 2917-2926, November 2003.
- [28] M. Ali, B. Ramamurthy and J. S. Deogun, "Routing and wavelength assignment with power considerations in optical networks", *Computer Networks*, vol. 32, issue 5, pp. 539-555, May 2000.
- [29] D. Medhi and K. Ramasamy, *Network Routing: Algorithms, Protocols, and Architectures*, Morgan Kaufmann, San Francisco, 2007.
- [30] H. Zang, J. P. Jue and B. Mukherjee, "Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks," *Optical Networks Magazine*, vol.1, no.1, pp. 47-60, 2000.
- [31] R. Krishnaswamy and K. Sivarajan, "Algorithms for Routing and Wavelength Assignment Based on Solutions of LP-Relaxations", *IEEE Communications letters*, vol. 5, no. 10, October 2001.

#### ABSTRACT

The algorithm for routing and wavelength assignment is developed in this paper. It is used in translucent optical networks in order to enable significant cut of costs for telecommunication operators due to the considerably lower number of nodes equipped with expensive optical/electrical/optical converters and regenerators. All losses due to physical impairments are eliminated by using these regenerators. The proposed RWA algorithm divides users by priority. The results show that the traffic flow is relatively balanced in the whole network, and the offered bandwidth is lower than requested only for the low priority customers. The greatest benefit this model provides is that the routing and wavelength assignment algorithm establishes a non-blocking structure for translucent optical network for the given set of input data.

#### ROUTING ALGORITHM IN TRANSLUCENT OPTICAL NETWORKS

Vladica N. Tintor