

## PROBLEM LOCIRANJA ČVOROVA SA KONVERZIJOM TALASNIH DUŽINA U OPTIČKIM TRANSPORTNIM MREŽAMA

Goran Marković, Dušan Teodorović  
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

**Sadržaj:** *U radu se istražuje problem lociranja čvorova sa konverzijom talasnih dužina u optičkim WDM mrežama sa rutiranjem po talasnim dužinama. Analiziran je uticaj primene konvertora talasnih dužina i izbora njihovih lokacija na ostvarene performanse u mreži. Primenjen je heuristički algoritam rutiranja i dodele talasnih dužina, zasnovan na metaheuristici Optimizacija kolonijom pčela (BCO, Bee Colony Optimization), za rešavanje problema izbora najbolje lokacije konvertora u optičkoj mreži u slučaju statičkog scenarija saobraćaja.*

**Ključne reči:** *Konverzija talasnih dužina, lokacije čvorova sa konverzijom talasnih dužina, optička transportna mreža, put svetlosti, rutiranje i dodela talasnih dužina.*

### 1. Uvod

Optičke mreže sa multipleksiranjem po talasnim dužinama (*WDM, Wavelength Division Multiplexing*) i rutiranjem puteva svetlosti na bazi talasnih dužina optičkih signala (*WRON, Wavelength Routed Optical Networks*), smatraju se jednom od izuzetno atraktivnih solucija za realizaciju optičkih transportnih mreža za široka područja (*WAN, Wide Area Networks*) [1].

*WRON* mrežu čine čvorovi sa optičkim *cross-connect* uređajima (*OXC, optical cross-connect*) koji su međusobno povezani optičkim *WDM* linkovima. Osnovni mehanizam komunikacije u *WRON* predstavlja put svetlosti (*lightpath*), uspostavljen između dva krajnja čvora na principu komutacije kola. Uspostavljanje puteva svetlosti u *WRON* zasniva se na rešavanju problema rutiranja i dodele talasnih dužina (*RWA, Routing and Wavelength Assignment*). Ukoliko u čvorovima mreže ne postoje konvertori talasnih dužina, put svetlosti mora biti uspostavljen na istoj talasnoj dužini duž svih linkova na izabranoj ruti od izvornog do odredišnog čvora. Ovo ograničenje, poznato kao ograničenje *kontinuiteta talasne dužine*, značajno doprinosi povećanju potrebnog broja talasnih dužina za uspostavljanje zahtevanih puteva svetlosti u mreži, odnosno povećanju verovatnoće blokiranja zahteva [2]. Negativne posledice ograničenja kontinuiteta talasnih dužina puteva svetlosti mogu se značajno ublažiti primenom postupka konverzije talasnih dužina u pojedinim čvorovima mreže. Implementacijom konverzije talasnih dužina u

mreži postiže se relaksacija ograničenja kontinuiteta talasne dužine puteva svetlosti. Konvertori talasnih dužina omogućavaju da se putevi svetlosti mogu uspostaviti korišćenjem različitih talasnih dužina na pojedinim segmentima (linkovima) duž izabrane rute, čime se generalno može postići efikasnije korišćenje raspoloživih resursa (talasnih dužina) u optičkoj *WDM* mreži. Rezultati istraživanja pokazuju da se performanse optičke *WDM* transportne mreže, mogu značajno unaprediti upotrebom konvertora talasnih dužina u pojedinim čvorovima (ruterima) mreže [3-10].

Imajući u vidu da konvertori talasnih dužina još uvek predstavljaju relativno skupu tehnologiju, jasno je da njihova implementacija u svim čvorovima mreže ne bi predstavljala ekonomski prihvatljivu soluciju. Osim toga, skorija teorijska i praktična istraživanja pokazuju da povećanje broja čvorova sa konverzijom talasnih dužina iznad određenih graničnih vrednosti ne doprinosi značajnom unapređenju performansi u mreži. Usled toga, jedno od suštinskih pitanja koje se nameće pri dizajniranju *WRON* mreža, odnosi se na rešavanje problema određivanja optimalnog (minimalnog) broja konvertora kao i izbora najboljih lokacija čvorova u kojima konvertori talasnih dužina treba da budu implementirani [10-20]. Pomenuti zadatak predstavlja veoma složen i izuzetno aktuelan problem, čije se rešavanje zasniva na pronalazenju kompromisnog rešenja između zahtevanih performansi i ukupnih troškova (cene) mreže .

## 2. Konvertori talasnih dužina

Konvertor talasnih dužina je uređaj koji ima funkciju da talasnu dužinu ulaznog optičkog signala konvertuje u neku drugu talasnu dužinu na svom izlazu. Idealan konvertor talasnih dužina mora da poseduje transparentnost u pogledu binarnih protoka i formata signala, da može da se brzo podesi na željenu (konvertovanu) talasnu dužinu, da može da obavlja konverziju i na više i na niže talasne dužine, da ima mogućnost da ulazni i izlazni signal imaju iste talasne dužine, da zadržava srednje nivoe ulazne snage, da bude neosetljiv na polarizaciju ulaznog signala, da ima veliki odnos signal/šum i da se lako implementira.

U zavisnosti od toga na koje talasne dužine se može izvršiti konverzija talasne dužine ulaznog signala, konvertori se mogu podeliti na sledeće 2 opšte grupe[1]: konvertore koji poseduju potpun stepen konverzije talasnih dužina (*FWC*, *Full Wavelength Conversion*) i konvertore sa ograničenim stepenom konverzije (*LWC*, *Limited Wavelength Conversion*). U slučaju *FWC* konvertora, talasna dužina ulaznog signala se može konvertovati na bilo koju drugu talasnu dužinu, dok se u slučaju *LWC* konvertora, konverzija može izvršiti samo na određeni skup (opseg) talasnih dužina. S obzirom da su konvertori skupi uređaji, kao i na činjenicu da njihova implementacija u sve čvorove optičke mreže ne bi mogla da obezbedi značajnije unapređenje performansi, potpuno je izvesno da će u većini praktičnih situacija, daleko izvesnija solucija biti da se samo u pojedinim čvorovima mreže implementiraju *FWC* konvertori. Takve mreže se nazivaju mreže sa retkom raspodelom (gustinom) konvertora talasnih dužina (*SWC*, *Sparse Wavelength Conversion*). Prema istraživanjima, čiji su rezultati prikazani u [9], stepen unapređenja performansi ne raste sa povećanjem gustine konvertora u mreži. Otuda proističe i činjenica da se primenom proređene (*SWC*) konverzije talasnih dužina u mreži mogu postići približno iste performanse kao i u slučaju primene konverzije talasnih dužina u svim čvorovima mreže.

U opštem slučaju, konverzija talasnih dužina se može realizovati kao: optoelektronska (O/E/O) konverzija (u kojoj optički signal mora najpre da se konvertuje u električni, pa zatim ponovo u optički na novoj talasnoj dužini) ili potpuno optička (OOO) konverzija (u kojoj signal ostaje u optičkom domenu). Jasno je da će budući koncept OOO konverzije omogućiti potpunu transparentnost, odnosno realizaciju potpuno optičkih umreža, s obzirom da današnja O/E/O konverzija nudi ograničenu digitalnu transparentnost, veću kompleksnost i veću potrošnju snage.

### 3. Efekti primene konverzije talasnih dužina

Veoma veliki broj sprovedenih istraživanja i rezultata vezanih za efekte primene konverzije talasnih dužina u *WRON* mrežama pokazuje da konverzija talasnih dužina ima značajan uticaj na unapređenje performansi u mreži. U opštem slučaju, poboljšanja performansi koja se mogu postići zavise od niza različitih faktora, među kojima su najznačajniji topologija mreže (posebno veličina i stepen povezanosti mreže), broj talasnih dužina po vlaknu, broj optičkih vlakana po linku, saobraćajni scenario, primenjeni algoritmi rutiranja i dodele talasnih dužina.

Rezultati istraživanja pokazuju da su efekti primene konverzije talasnih dužina u potpuno povezanoj i prstenastoj mreži, uz primenu algoritma rutiranja po najkraćoj ruti samo neznatni u poređenju sa *mesh* topologijom mreže, u kojoj se postižu značajnija poboljšanja performansi. Osim toga, u mrežama sa velikim brojem vlakana po linku poboljšanja koja se mogu postići primenom konvertora opadaju eksponencijalno sa porastom broja vlakana. Primenjeni algoritmi rutiranja (fiksno, alternativno i iscrpljujuće) kao i algoritmi za dodelu talasnih dužina (slučajni izbor, prva raspoloživa, najmanje korišćena, najviše korišćena talasna dužina i dr) pokazuju različite efekte sa primenom konverzije talasnih dužina.

Rezultati istraživanja efekata primene konvertora talasnih dužina u slučajno generisanim *mesh* mrežama sa 16 do 1000 čvorova i jednim vlaknom po linku, pokazuju unapređenja iskorišćenosti resursa za 10 do 40 % [21]. U literaturi se može naći veoma iscrpno poređenje performansi za različite algoritme rutiranja i dodele talasnih dužina u optičkim mrežama sa i bez primene konvertora talasnih dužina dobijenih na osnovu analitičkih i simulacionih metoda. [10,21-24]

### 4. Lociranje konvertora talasnih dužina

Imajući u vidu prethodno navedeno, jasno je da se kao jedan od izazovnih problema koji se neminovno nameće pri dizajniranju *WRON* mreža odnosi na pitanje određivanja minimalnog potrebnog broja konvertora kao i njihovih optimalnih lokacija tako da budu postignute zahtevane performanse/cena mreže.

Problem određivanja optimalnog broja i lokacija čvorova sa konverzijom talasnih dužina je široko istraživani problem u velikom broju studija [6-20]. Izbor lokacija čvorova sa konverzijom svakako zavisi od karaktera saobraćajnih zahteva u mreži. Shodno tome, potrebno je razlikovati sledeća 2 opšta scenarija: statički saobraćajni scenario (matrica saobraćajnih zahteva je unapred poznata) i dinamički saobraćajni scenario (saobraćajni zahtevi nailaze potpuno slučajno u vremenu i imaju slučajno vremensko trajanje). U slučaju statičkog scenarija pri određivanju najboljih lokacija

čvorova sa konverzijom talasnih dužina kriterijumska funkcija ima za cilj optimizaciju korišćenja resursa mreže, odnosno minimizaciju ukupne cene mreže (npr. minimizacija potrebnog broja talasnih dužina, broja konverzija talasnih dužina ili broja optičkih vlakana), tako da svi zahtevani putevi svetlosti u mreži budu uspostavljeni, dok je u slučaju dinamičkih saobraćajnih zahteva osnovni cilj da se minimizira verovatnoća blokiranja zahteva pri raspoloživim resursima u mreži.

Za rešavanje problema određivanja optimalnih lokacija čvorova sa konverzijom talasnih dužina korišćene su različite analitičke metode. U [7], [11] i [20] su predložene *ILP (Integer Linear Programm)* formulacije za maksimizaciju prosečne verovatnoće uspešnog uspostavljanja puteva svetlosti s kraja na kraj, maksimizaciju iskorišćenosti konvertora talasnih dužina, i minimizaciju verovatnoće blokiranja zahteva u mreži, respektivno. U predloženim analitičkim modelima pretpostavljeno je da se primenjuje fiksno rutiranje (po najkraćoj ruti) u cilju jednostavnije procene verovatnoće blokiranja.

Međutim, Chu i Li [6] su pokazali da su problem lociranja konvertora talasnih dužina i problem rutiranja i dodele talasnih dužina (*RWA*) međusobno veoma tesno povezani problemi i da ih je neophodno integralno rešavati u cilju postizanja što boljih performansi u mreži. Pokazano je da dobro dizajniran mehanizam lokacije konvertora talasnih dužina za specificiranu *RWA* proceduru tipično ne daje dovoljno dobre rezultate i za neki drugi primenjeni postupak rutiranja i dodele talasnih dužina. Iz tog razloga, ovi autori su predložili odgovarajuće heurističke algoritme za lociranje konvertora talasnih dužina pri različitim primenjivanim algoritmima rutiranja i dodele talasnih dužina. Izuzetno velika kompleksnost problema određivanja optimalnog broja i lokacija čvorova sa konverzijom talasnih dužina često nameće i primenu različitih metaheurističkih metoda za njihovo rešavanje. Tako na primer, u [25] i [26] su korišćeni genetski algoritmi, u [27] tabu pretraživanje, a u [28] optimizacija kolonijom čestica.

#### 4.1 Problem lociranja konvertora u slučaju statičkog saobraćajnog scenarija

Problem određivanja optimalnih lokacija čvorova sa konverzijom talasnih dužina u slučaju statičkog scenarija saobraćaja može se formulisati na sledeći način: za dati broj konvertora sa potpunim stepenom konverzije talasnih dužina, poznate saobraćajne zahteve i datu topologiju mreže potrebno je odrediti *koje od čvorova mreže treba opremiti sa FWC konvertorima tako da se optimizuje korišćenje resursa mreže.*

U okviru istraživanja ovog problema u literaturi je predložen veoma veliki broj heurističkih algoritama i egzaktnih *ILP* formulacija. Pokazuje se da optimalno rešavanje problema lociranja čvorova sa konverzijom talasnih dužina predstavlja NP-težak optimizacioni zadatak. Jedna od egzaktnih (*ILP*) formulacija ovog problema, kojom se minimizira potreban broj konverzija talasnih dužina tako da budu zadovoljeni svi saobraćajni zahtevi u mreži, predložena je u [26].

Uvodeći sledeće notacije:

$\rho_{r_i}^{s,d}$  - broj puteva svetlosti između para čvorova ( $s,d$ ) uspostavljenih preko rute  $r_i$

$$\sigma_{r_i}^{j\lambda_l, k\lambda_m} = \begin{cases} 1, & \text{ako je na ruti } r_i, \text{ put svetlosti uspostavljen na talasnoj dužini } \lambda_l \text{ duž} \\ & \text{linka } j, \text{ i talasnoj dužini } \lambda_m \text{ duž linka } k, \\ 0, & \text{u suprotnom.} \end{cases}$$

$d^{s,d}$  - broj zahtevanih puteva svetlosti između para čvorova  $(s,d)$

$r_i$  - ruta  $i$  definisana nizom linkova  $(j_1, j_2, \dots, j_n)$

$|r_i|$  - broj čvorova na ruti  $r_i$

$C_{i,k}$  - broj konverzija između linkova  $j$  i  $k$

$R^{s,d}$  - skup unapred definisanih ruta između para čvorova  $(s,d)$

$w$  - broj talasnih dužina po vlaknu

ILP optimizacioni zadatak se može formulisati u sledećem obliku:

$$\min \left( \sum_j \sum_{k \neq j} C_{jk} \right) \quad (1)$$

gde je:

$$C_{j,k} = \sum_{sd} \sum_{r_i \in R^{sd}} \sum_{l=1}^w \sum_{m=1}^w \sigma_{r_i}^{j\lambda_l, k\lambda_m} \quad (2)$$

pri čemu su  $j$  i  $k$  susedni linkovi na ruti, a skup ograničenja je dat izrazima (3)-(7).

$$d^{sd} = \sum_{r_i \in R^{sd}} \rho_{r_i}^{sd} \quad \text{za } \forall \text{ par čvorova } (s,d) \quad (3)$$

gde je:

$$\rho_{r_i}^{sd} = \frac{\sum_{j \in r_i} \sum_{l=1}^w \sum_{k=1}^w \sigma_{r_i}^{j\lambda_l, (j+1)\lambda_k}}{|r_i|} \quad (4)$$

gde  $(j+1)$  označava naredni link posle linka  $j$  na ruti  $r_i$ .

$$\sum_{sd} \sum_{r_i \in R^{sd}} \sum_{j \in r_i} \sum_{k=1}^w \sigma_{r_i}^{j\lambda_l, (j+1)\lambda_k} \leq 1 \quad \text{za } \forall \lambda_l \text{ na svakom linku } j \quad (5)$$

$$\sum_{m=1}^w \sum_{l=1}^w \sigma_{r_i}^{j\lambda_l, (j+1)\lambda_m} = \rho_{r_i}^{sd} \quad (6)$$

$$0 \leq \rho_{r_i}^{sd} \leq w \quad (7)$$

Ograničenja (3) i (4) obezbeđuju da je zahtevani broj puteva svetlosti između para čvorova  $(s,d)$  jednak broju uspostavljenih puteva svetlosti. Ograničenje (5) obezbeđuje da se svaka talasna dužina na bilo kom linku u mreži može koristiti za uspostavljanje najviše jednog puta svetlosti. Ograničenjem (6) postiže se da na svakom

linku  $j$ , duž rute  $r_i$ , broj zauzetih talasnih dužina mora biti jednak broju uspostavljenih puteva svetlosti duž posmatrane rute  $r_i$ . Poslednjim ograničenjem, (7) postiže se da broj puteva svetlosti između para čvorova  $(s,d)$  uspostavljenih preko rute  $r_i$ , može najviše biti jednak broju raspoloživih kanala (talasnih dužina). Broj ograničenja i promenljivih u prikazanoj *ILP* formulaciji se veoma rapidno povećava sa porastom veličine mreže, što ograničava mogućnost primene samo na mreže manjih dimenzija. U slučaju mreža većih dimenzija neophodna je primena heurističkih tehnika.

#### 4.2 Problem lociranja konvertora u slučaju dinamičkog saobraćajnog scenarija

U slučaju dinamičkog scenarija saobraćaja, zahtevi za uspostavljanjem puteva svetlosti se pojavljuju potpuno slučajno u vremenu i imaju slučajno vremensko trajanje. Uspostavljanje puteva svetlosti vrši se u trenutku njihovog pojavljivanja. Kao posledica slučajnosti (neizvesnosti) u pogledu zahtevanih zauzimanja resursa, problem određivanja optimalnih lokacija čvorova sa konverzijom talasnih dužina je značajno složeniji u odnosu na statički slučaj. Do sada je sproveden veoma veliki broj istraživanja posvećenih rešavanju ovog problema [6,7,8,11,13,18,19,26]. Većina algoritama vezanih za rešavanje ovog problema ima za cilj minimizaciju verovatnoće blokiranja zahteva u mreži. Za procenu verovatnoće blokiranja zahteva primenjuju se analitičke i simulacione metode.

U [7] je predložen optimizacioni model za rešavanje problema izbora lokacija za konvertore talasnih dužina tako da se minimizira ukupna verovatnoća blokiranja. Matematički je formulisana verovatnoća uspešnog uspostavljanja puteva svetlosti kao polinomijalna funkcija lokacija konvertora. Koristeći ovu formulaciju, problem je rešavan kao zadatak minimizacije polinomialne funkcije binarnih (0-1) promenljivih pri linearnom skupu ograničenja, a zatim je predložen algoritam pretraživanja za pronalaženje optimalnih lokacija konvertora.

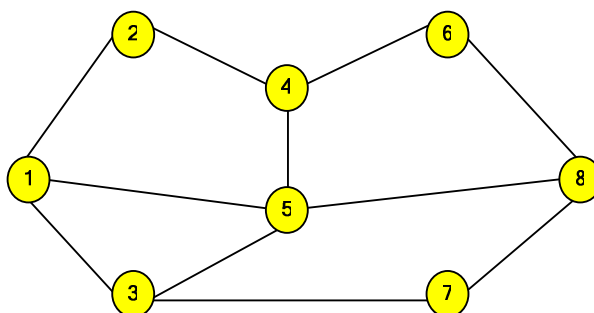
Većina istraživanja odnosi se na generalne topologije mreža i primenu različitih heurističkih algoritama za rešavanje problema. U [11] je predložena heuristika za rešavanje problema lociranja *FWC* konvertora u mrežama sa proizvoljnom topologijom i proizvoljnim saobraćajnim profilima. *Venugopal* i ostali su u [19] predložili heuristiku za *LWC* konvertore zasnovanu na opterećenju čvora, dužini puteva svetlosti i čvorovima u kojima se ostvaruje veliki broj konverzija. U [18] je rešavan problem optimalnog lociranja čvorova sa konverzijom talasnih dužina za topologije puta, magistrale i prstenaste mreže korišćenjem dinamičkog programiranja u slučajevima uniformnog i neuniformnog saobraćaja. Pokazano je da se može postići značajno unapređenje verovatnoće blokiranja u slučaju primene optimalnog rešenja problema lociranja konvertora u odnosu na strategiju slučajnog izbora čvorova sa konverzijom talasnih dužina.

U [14] autori su pokazali da se verovatnoća blokiranja na putu može minimizirati kada se izvrši podela puta na segmente sa jednakim verovatnoćama blokiranja pod pretpostavkom da su opterećenja na pojedinim linkovima nezavisna. Autori su predložili tri različita heuristička algoritma za podelu puta na segmente sa jednakim verovatnoćama blokiranja. Ovakav pristup se može primeniti i na mrežne topologije oblika magistrale i prstena. U [4-6], analizirana je međusobna zavisnost između različitih *RWA* algoritama i problema lociranja konvertora talasnih dužina. Istraživane su performanse različitih *RWA* algoritama u slučaju mreža sa retkom

konverzijom talasnih dužina i utvrđeno je da konvencionalno primenjivani *RWA* algoritmi ne obezbeđuju dovoljno dobre performanse u takvim mrežama. U [4] je predložen heuristički algoritama za lociranje konvertora talasnih dužina koji bi se mogao efikasno koristiti u sprezi sa dinamičkim algoritmom rutiranja po najmanje opterećenoj ruti i izborom prve raspoložive talasne dužine (LLR-FF, least-loaded routing – first fit). U [6] je takođe predložen heuristički algoritam za lociranje konvertora koji se može koristiti uz primenu algoritma fiksnog-alternativnog rutiranja i selekcijom prve indeksirane slobodne talasne dužine (FAR- FF, fixed alternate routing – first-fit). Pored toga, u literaturi je predložen i veliki broj heurističkih algoritama za lociranje konvertora, po principu jedan po jedan, u *mesh* topologijama mreža. U većini od predloženih algoritama, odluka o izboru lokacije čvora u kome će biti postavljen konvertor donosi se uzimajući u obzir veličinu saobraćaja u pojedinim čvorovima mreže.

### 5. Određivanje lokacija čvorova sa konverzijom talasnih dužina primenom *BCO* metaheuristike

U nastavku rada prikazani su rezultati istraživanja do kojih su autori došli rešavajući statički problem rutiranja i dodele talasnih dužina (*RWA*) u optičkim *WDM* mrežama sa konverzijom talasnih dužina u jednom čvoru mreže. Za rešavanje ovog problema korišćen je *BCO-RWA* algoritam [29], zasnovan na nedavno predloženoj metaheuristici *Optimizacija kolonijom pčela (BCO, Bee Colony Optimization)*[30,31]. Za potrebe rešavanja problema izbora najbolje lokacije čvorova sa konverzijom talasnih dužina, predloženi *BCO-RWA* algoritam je modifikovan, tako da podržava *FWC* konverziju u jednom od potencijalnih čvorova mreže. Višestrukim testiranjem algoritma, uz postavljanje konvertora talasnih dužina u različitim čvorovima mreže, na osnovu dobijenih rezultata za ukupan broj uspostavljenih puteva svetlosti moguće je odrediti izbor najbolje lokacije čvora sa konverzijom talasnih dužina. Radi ilustracije rešavanog problema, ovde su prikazani rezultati testiranja sprovedenih na jednom primeru optičke *WDM* mreže sa 8 čvorova i 11 linkova (sa po jednim nezavisnim optičkim vlaknom za svaki smer prenosa), čija je fizička topologija prikazana na slici 1.

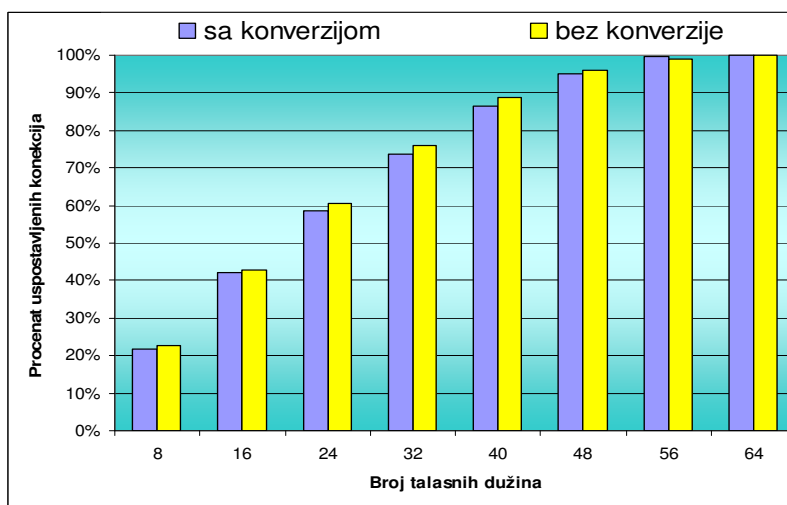


Slika 1. Topologija posmatrane *WDM* mreže

Kao saobraćajni scenario u prikazanoj mreži korišćena je slučajno (uniformno) generisana matrica saobraćajnih zahteva,  $D$ , između pojedinih parova čvorova (uz maksimalno 15 zahtevanih puteva svetlosti između svakog para čvorova):

$i \setminus j$	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	3	10	6	13	13	14	3
2	10	0	6	8	8	7	8	6
3	5	14	0	6	15	6	5	10
$D = 4$	12	2	11	0	15	5	6	4
5	15	14	12	8	0	7	11	1
6	15	4	9	2	7	0	2	11
7	1	9	15	4	3	15	0	13
8	7	11	12	1	10	1	6	0

Na slici 2 prikazani su dobijeni rezultati za broj uspostavljenih puteva svetlosti (maksimum tokom 10 nezavisnih testiranja algoritma) za različiti broj raspoloživih talasnih dužina u mreži  $W$ , u slučaju konverzije talasnih dužina u čvoru broj 5 i slučaju kada se konverzija talasnih dužina u mreži ne primenjuje. Na osnovu dobijenih rezultata, može se zaključiti da se postavljanjem konvertora u ovom čvoru ne bi postiglo unapređenje performansi (šta više, broj uspostavljenih puteva svetlosti u mreži bi se neznatno smanjio u odnosu na slučaj bez konverzije). Iz tog razloga, neophodno je ispitati kakve bi efekte, pri datom scenariju saobraćaja u posmatranoj mreži, imalo postavljanje konvertora u ostalim čvorovima mreže. Rezultati ovih testiranja prikazani su na slici 3, za različiti broj talasnih dužina u mreži.



Slika 2. Poređenje broja uspostavljenih puteva svetlosti u mreži u slučaju bez konverzije i sa konverzijom talasnih dužina u čvoru #5





Slika 3. Broj uspostavljenih puteva svetlosti pri različitim lokacijama konvertora talasnih dužina (slučaj KONV=0 odgovara situaciji bez konverzije)

## 6. Zaključak

U radu je istraživana uticaja primene postupka konverzije talasnih dužina u optičkim WDM mrežama sa rutiranjem po talasnim dužinama na ukupan broj uspostavljenih puteva svetlosti u mreži. Rezultati sprovedenih istraživanja pokazuju da saobraćajne performanse (broj uspostavljenih puteva svetlosti), osim od broja raspoloživih talasnih dužina, što predstavlja dominantni faktor, zavise takođe i od lokacije čvorova u kojima su postavljeni konvertori talasnih dužina. Jasno je da izbor najbolje lokacije

čvorova sa konverzijom talasnih dužina predstavlja izazovan optimizacioni zadatak u slučaju mreža sa većim brojem čvorova. U radu je, na primeru jedne mreže sa manjim brojem čvorova, pokazano kako se do rešenja ovog problema može efikasno doći, ukoliko se konverzija talasnih dužina primenjuje samo u jednom čvoru mreže. Postavljanje konvertora talasnih dužina u većem broju čvorova potencijalno bi dovelo do dodatnog unapređenja performansi u mreži, što će predstavljati predmet daljih istraživanja vezanih za ovu problematiku.

## Literatura

- [1] S. Ram Murthy, M.Gurusamy, *WDM Optical Networks -Concepts, Design and Algorithms*, Prentice Hall, 2002.
- [2] H. Zang, J. P. Jue, and B. Mukherjee, "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks," *SPIE Opt. Network. Magazine*, vol. 1, pp. 47–60, Jan. 2000.
- [3] E. Karasan, E. Ayanoglu, "Performance of WDM Transport Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 16, No. 7, pp. 1081-1096, Sep. 1998.
- [4] X.Cu, B. Li, K. Sohraby, "Routing and Wavelength Assignment vs. Wavelength Converter Placement in All-Optical Networks", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 41, No. 8, pp. S22-S28, August 2003.
- [5] X. Cu, B. Li, K. Sohraby, Z. Zhang, "Routing and Wavelength Assignment Issues in the Presence of Wavelength Conversion for All-Optical Networks", *Proceedings of IEEE Globecom'02*, pp. 2787-2791, Taiwan, November 2002.
- [6] X. Chu, B. Li, I. Chlamtac, "Wavelength Converter Placement under different RWA Algorithms in Wavelength-Routed All-Optical Networks", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 51, No. 4, pp. 607-617, April 2003.
- [7] S. Gao, X. Jia, "An optimization model for placement of Wavelength converters to minimize blocking probability in WDM networks", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, No 3, pp. 684-, March 2003.
- [8] Chunsheng Xin, "Dynamic Traffic grooming in optical networks with wavelength conversion", *IEEE Trans. On Selected Areas in Communications, Supplement on Optical Communication and Networking*, Vol.25, No.9, pp.50-57, Dec. 2007.
- [9] S. Subramaniam, M. Azizoglu, A.K. Somani, "All-optical networks with sparse wavelength conversion", *IEEE/ACM Transactions on Networking* Vol. 4, No. 4, pp. 544–557, Aug. 1996
- [10] M. Kovacevic, A.S. Acampora, "Benefits of wavelength translation in all-optical clear-channel networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 14, No.5, pp. 868–880, June 1996.
- [11] G. Xiao and Y.W. Leung, "Algorithms for allocating wavelength converters in all-optical networks", *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 7, pp.545-557, Aug, 1999.
- [12] S. Subramaniam and M. Azizoglu, "On Optimal Converter Placement in Wavelength-Routed Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 7, No. 5, pp. 754-766, Oct. 1999.

- [13] S. Gao, X. Jia, C. Huang, D. Du, "An Optimization for Placement of Wavelength Converters to Minimize Blocking Probability in WDM Networks", *Journal of Lightwave Technology*, Vol.21, No. 3, March 2003.
- [14] L. Li, A. K. Somani, "Efficient Algorithms for Wavelength Converter Placement", *Optical Networks Magazine*, Vol. 3, No. 2, pp. 54-62, March/April 2002.
- [15] P. N. Tran, U. Killat, "An Exact ILP Formulation for Optimal Wavelength Converter Usage and Placement in WDM Networks" *Proceedings of IEEE GLOBECOM 2008*, pp.1-6, Nov/Dec 2008
- [16] S. Thiagarajan, A. K. Somani "Optimal wavelength converter placement in arbitrary topology wavelength-routed networks" *Computer Communications* 26, Elsevier (2003), 975–985, [www.elsevier.com/locate/comcom](http://www.elsevier.com/locate/comcom)
- [17] X. Jia, D. Du, X. Hu, H. Huang and D. Li, "On the optimal placement of wavelength converters in WDM networks", *Computer Communications* 26, pp. 986-995, 2003.
- [18] S. Subramaniam, M. Azizoglu, A.K. Somani, "On the Optimal Placement of Wavelength Converters in Wavelength-routed Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 7. No.5, pp. 754-766, Oct 1999.
- [19] K.R. Venugopal, M. Shivakumar, P. Sreenivasa, "A Heuristic for Placement of Limited Range Wavelength Converters in All-Optical Networks", *Proceedings of IEEE INFOCOM'99*, Vol. 2, pp. 908-915, March, 1999.
- [20] H.Y. Jeong, S.W. Seo, "A binary linear program formulation for the placement of limited-range wavelength converters in wavelength-routed WDM networks", *IEEE/OSA Journal of Lightw Techn.*, vol. 23, No.10, pp. 3076-3091, Oct. 2005.
- [21] R.Ramaswami and K.N. Sivarajan, "Optimal routing and wavelength Assignment in all-optical networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 3, No.5, pp 489-500, October 1995.
- [22] E. Karasan and E. Ayanoglu, "Effects of wavelength routing and selection algorithms on wavelength conversion gain in WDM optical networks," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 6, no. 2, pp. 186–196, Apr. 1998.
- [23] A. Birman, "Computing approximate blocking probabilities for a class of all-optical networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* Vol. 14., No.5. pp. 852–857, June 1996.
- [24] R.A. Barry, P.A. Humblet, "Models of blocking probability in all optical networks with and without wavelength changers", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* Vol.14, No.5, pp. 858–867, June 1996.
- [25] C. Vijayanand, M. Shiva Kumar, K.R. Venugopal, P. Sreenivasa Kumar: "Converter placement in all-optical networks using genetic algorithms" *Computer Communications* 23, pp. 1223-1234, Elsevier (2000)
- [26] J. H. Siregar, H. Takagi, Y. Zhang, "Optimal Wavelength Converter Placement in Optical Networks by Genetic Algorithm", *IEICE Transactions on Communications* Vol. E85-B, No. 6. pp. 1075-1082, June 2002.
- [27] N. Sengezer and E. Karasan, "A tabu search algorithm for sparse placement of wavelength converters in optical networks", *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3280/2004, pp. 247-256, Oct. 2004.
- [28] Y. C. Foo, S. F. Chien, A. L. Y. Low and C. F. Teo, "New strategy for optimizing wavelength converter placement", *Optics Express*, vol. 13, No. 2, pp. 545-551, January 2005.

- [29] G. Marković, D. Teodorović, V. Aćimović-Raspopović, "Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks Based on the Bee Colony Optimization", *AI Communications – Special Issue: Network Analysis in Natural Sciences and Engineering*, Vol.20, No.4, pp. 273-285, Nov. 2007
- [30] P. Lučić, D. Teodorović, "Computing with Bees: Attacking Complex Transportation Engineering Problems", *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, vol. 12, pp. 375-394, 2003.
- [31] D. Teodorović, P. Lučić, G. Marković, Mauro Dell' Orco, "Bee Colony Optimization: Principles and Applications", *Proc. on 8th NEUREL Conference 2006*, pp.151-156. Belgrade, Sept. 2006.
- [32] G. Marković, Optimizacija korišćenja resursa u optičkim mrežama sa rutiranjem po talasnim dužinama, Doktorsta disertacija, Saobraćajni fakultet, Beograd 2007.

**Abstract:** *In this paper, we study the problem of placing the wavelength converting nodes in a single-fiber wavelength routed optical transport network. The effects of wavelength conversion to the network resource usage are discussed and analyzed. We used the Bee Colony Optimization (BCO)-based metaheuristic algorithm for solving the routing and wavelength assignment (RWA) problem in order to determine the best node location to place the wavelength converter in a case of static traffic demands.*

**Keywords:** *Wavelength conversion, converter node locations, optical transport network, light-path, routing and wavelength assignment problem.*

## WAVELENGTH CONVERTER PLACEMENT PROBLEM IN OPTICAL TRANSPORT NETWORKS

Goran Marković, Dušan Teodorović