

Optimizacija korišćenja resursa u optičkim WDM mrežama primenom RWA algoritama

Goran Z. Marković, Vladanka S. Aćimović-Raspopović

Sadržaj — U radu je prikazan deo rezultata istraživanja koji se odnose na rešavanje problema dizajniranja i optimizacije korišćenja resursa u potpuno optičkim mrežama sa rutiranjem po talasnim dužinama. Posebno važan problem koji se pri tome mora rešavati odnosi se na rutiranje i dodelu talasnih dužina puteva svetlosti (RWA, Routing and Wavelength Assignment). U radu su prikazani rezultati naših istraživanja statičkih i dinamičkih RWA problema.

Gljučne reči — Optimizacija, optička mreža, put svetlosti, resursi mreže, rutiranje i dodela talasnih dužina.

I. UVOD

OPTIČKI komunikacioni sistemi sa multipleksiranjem po talasnim dužinama (WDM, Wavelength Division Multiplexing) danas intenzivno evoluiraju ka budućim potpuno optičkim (AON, All Optical Networks) mesh arhitekturama u kojima će se komunikacija između bilo koja dva krajnja čvora ostvarivati potpuno u optičkom domenu, bez O/E/O konverzije u međučvorovima radi procesiranja signala. AON mreže u kojima se rutiranje izvršava u optičkom domenu na osnovu talasnih dužina prenošenih optičkih signala nazivaju se optičkim mrežama sa rutiranjem po talasnim dužinama (WRON, Wavelength Routed Optical Networks) [1].

Potpuno optičke mreže sa rutiranjem po talasnim dužinama i WDM prenos velikog kapaciteta danas se mogu smatrati jednim od izuzetno atraktivnih rešenja za realizaciju okosnica mreža naredne generacije od kojih se očekuje zadovoljenje sve većih zahteva za potrebnim kapacitetom i pouzdanošću, kao i sve strožijih zahteva u pogledu kvaliteta koje diktiraju novi telekomunikacioni servisi.

Problemi dizajniranja i optimalnog korišćenja resursa WRON mreža predstavljaju u poslednje vreme predmet širokog istraživačkog interesovanja. Ogroman porast obima saobraćaja u telekomunikacionim mrežama tokom poslednjih godina, prvenstveno kao posledica eksplozivnog rasta Interneta, zajedno sa ubrznim tehnološkim razvojem optičkih komponenata za WDM,

Ovaj rad predstavlja deo rezultata istraživanja u okviru projekta *Planiranje, tarifiranje i prognoziranje u telekomunikacijama* koji je finansiran od strane Ministarstva za nauku Republike Srbije (TP-6106A)

Goran Z. Marković, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Srbija (tel 011-3091-225; e-mail: g.markovic@sf.bg.ac.yu).

Vladanka S. Aćimović-Raspopović, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Srbija (tel. 011-3091-398; e-mail: v.acimovic@sf.bg.ac.yu).

motivisali su istraživače širom sveta za rešavanje izuzetno važnog i kompleksnog problema optičkog WDM umrežavanja. Osnovni cilj je da se postojeći reursi mreže iskoriste na što efikasniji način kako bi se prevazišla tehnološka i ekonomska ograničenja u široj primeni komponenata za optičko procesiranje signala. Jedan od suštinski važnih problema, čijim efikasnim rešavanjem se može postići bolje korišćenje raspoloživih resursa i unapređenje performansi u mreži odnosi se na problem rutiranja i dodele talasnih dužina (RWA, Routing and Wavelength Assignment) putevima svetlosti.

Cilj ovog rada je da prezentira neke moguće pristupe za rešavanje RWA problema u WRON mrežama sa kontinuitetom talasne dužine i uporedi po efikasnosti neke potencijalne algoritme za rešavanje ovog problema. Osim samog RWA problema, ključni problemi koji su sa njim direktno povezani uključuju i rešavanje problema dizajniranja logičke topologije mreže i rekonfiguracije logičke topologije usled promene saobraćajnih zahteva na pojedinim linkovima u mreži ili otkaza komponenata mreže. Pomenute probleme autori su ranije već istraživali, a neki rezultati istraživanja prikazani su u [2].

Rad je organizovan na sledeći način. U drugom odeljku objašnjeni su osnovni aspekti rešavanja RWA problema u WRON mrežama. Treći odeljak se odnosi na klasifikaciju RWA problema i mogućih algoritama za njegovo rešavanje. Četvrto poglavlje obuhvata pregled mogućih pristupa za rešavanje RWA problema, dok je u petom odeljku prikazan deo rezultata istraživanja do kojih su autori ovog rada došli rešavanjem statičkih i dinamičkih RWA problema u WRON mrežama bez konverzije talasnih dužina u međučvorovima.

II. OPTIČKE MREŽE SA RUTIRANJEM PO TALASNIM DUŽINAMA

Osnovni mehanizam komunikacije u WRON mrežama predstavlja put svetlosti. Put svetlosti (*lightpath*) je optička komunikaciona veza uspostavljena između izvornog i odredišnog čvora na principu komutacije kola, kojoj se dodeljuje ista talasna dužina na čitavoj ruti duž koje se signal prenosi. Rutiranje optičkih signala, vrši se transparentno za sve binarne protoke i formate, bez usputnog O/E/O procesiranja u međučvorovima. Jasno je da se problem optičkog umrežavanja kod WRON mreža predstavlja problem rutiranja po talasnim dužinama.

Za datu topologiju WRON mreže komunikacija između dva krajnja čvora mreže vrši se uspostavljanjem puteva svetlosti preko jednog ili više rutera talasnih dužina. Da bi

se put svetlosti kroz WRON mrežu uspostavio, neophodno je prvo odrediti rutu koju će on koristiti (niz fizičkih linkova), a zatim dodeliti jedinstvenu talasnu dužinu na svakom linku duž izabrane rute. U odnosu na rešavanje problema rutiranja u elektronskom domenu u tradicionalnim mrežama sa komutacijom kola, u WRON mrežama problem rutiranja postaje kompleksniji za rešavanje, jer dobija i prostor talasnih dužina kao dodatnu dimenziju. Osnovno ograničenje koje se postavlja pri ovoj proceduri odnosi se na to da dva puta svetlosti na istim talasnim dužinama ne mogu biti rutirana preko istog fizičkog linka (u mrežama sa jednim optičkim vlaknom po linku). Kada se veza uspostavi, talasna dužina na kojoj se ona ostvaruje ostaje zauzeta na svim optičkim linkovima za sve vreme trajanja veze. U literaturi je predložen veliki broj različitih algoritama za rešavanje problema rutiranja i dodele talasnih dužina u optičkim WDM mrežama. Detaljan pregled različitih predloženih RWA algoritama može se naći u [3].

III. KLASIFIKACIJA RWA PROBLEMA I ALGORITAMA

RWA problemi se mogu, prema scenariju saobraćaja, generalno podeliti na dve kategorije: *statičke* i *dinamičke*.

Kod statičkih RWA problema, skup svih zahtevanih puteva svetlosti koje treba uspostaviti u mreži je unapred potpuno poznat, pri čemu je sve zahtevane puteve svetlosti potrebno uspostaviti odjednom, a svaki od njih ima neograničeno vremensko trajanje. Statički RWA problem predstavlja kombinatorni optimizacioni problem koji se može formulisati i rešavati preko zadatka celobrojnog linearnog programiranja (ILP, Integer Linear Program). Ovaj zadatak izvršava se u „off-line“ režimu. Tipična kriterijumska funkcija pri rešavanju statičkog RWA problema je minimiziranje potrebnog broja talasnih dužina tako da svi zahtevani putevi svetlosti u datoj mreži budu uspostavljeni (Min-RWA problem). Moguće je rešavati i dualni zadatak, kojim se za unapred dati broj raspoloživih talasnih dužina u mreži maksimizira broj zahtevanih puteva svetlosti koji se mogu uspostaviti u mreži (Max-RWA problem). Rešavanje RWA problema u slučaju statičkog saobraćajnog scenarija sreće se i pod nazivom SLE (Static Lightpath Establishment) [1, 3].

Kod dinamičkih RWA problema, zahtevi za uspostavljanjem puteva svetlosti između pojedinih parova čvorova u mreži se pojavljuju potpuno slučajno u vremenu i imaju slučajno vremensko trajanje. Za razliku od statičkih RWA problema, dinamički RWA algoritmi moraju biti značajno jednostavniji u pogledu kompleksnosti proračunavanja, s obzirom da je svaki put svetlosti potrebno „on-line“ procesirati u trenutku nailaska zahteva. Ovaj problem se u literaturi sreće i pod nazivom DLE (Dynamic Lightpath Establishment) [1, 3]. Osnovni cilj kod dinamičkih RWA problema je minimizirati verovatnoću blokiranja zahteva do nekog vremenskog trenutka. DLE problem je kompleksan za rešavanje, posebno u slučaju mreža većih dimenzija i izrazite dinamičnosti saobraćajnih zahteva. Iz tog razloga, rešavanje DLE problema se tipično zasniva na razdvajanju RWA problema na dva nezavisna potproblema

(potproblem izbora rute između izvornog i odredišnog čvora i potproblem dodele talasne dužine putu svetlosti duž izabrane rute). Specifičnost nekog dinamičkog RWA algoritma određena je brojem ruta kandidata i načinom kako se one proračunavaju, izabranim kriterijumom po kome se uređuju rute i talasne dužine, kao i redosledom kojim se njima pristupa u odgovarajućim tabelama.

Klasifikacija algoritama za selekciju rute, zasnovana na ograničenjima, ukoliko ih ima, obuhvata tri osnovne klase koje se označavaju kao: fiksno (FR, Fixed Routing), alternativno (AR, Alternate Routing) i iscrpljujuće (ER, Exhaust Routing) rutiranje.

Algoritam fiksnog rutiranja (FR) je najjednostavniji metod rutiranja jer se za svaki par čvorova p unapred odredi samo jedna fiksna ruta R^p (koja je po pravilu najkraća između datih čvorova) i koja se ne menja bez obzira na promenu saobraćajnih zahteva. Na pojavu zahteva za uspostavljanje puta svetlosti algoritam proverava da li je neka talasna dužina slobodna na svim linkovima duž rute R^p . Ukoliko nema slobodnih talasnih dužina, zahtev se blokira. Topologija mreže ima značajan uticaj na performanse mreže, a rezultati su lošiji za mreže sa velikim stepenom povezanosti čvorova gde postoji veliki broj dostupnih ruta između svaka dva čvora.

Kod primene algoritama alternativnog rutiranja (AR) za svaki par čvorova odredi se unapred skup od k mogućih ruta kandidata ($R_0^p, R_1^p, \dots, R_{k-1}^p$) koji predstavlja podskup svih mogućih ruta za dati par čvorova p . Izbor raspoložive rute za uspostavljanje puta svetlosti može se vršiti prema fiksnom redosledu (FAR, Fixed Alternate Routing) ili adaptivno izborom rute sa najvećim brojem slobodnih talasnih dužina na ruti (LCR, Least Congestion Routing). Kada se pojavi zahtev za uspostavljanje puta svetlosti rute kandidati se pretražuju po fiksnom rasporedu i prva od njih sa konačnom cenom (slobodnom talasnom dužinom) se bira. Ukoliko nema rute sa konačnom cenom, zahtev se blokira. Ukoliko ima više slobodnih talasnih dužina na izabranoj ruti, primenjuje se neki od algoritama za selekciju talasnih dužina za izbor preferentne. Druga varijanta klase AR algoritama rutiranja - rutiranje po najmanje zagušenoj putanji (LCR) bira za preferentnu rutu onu koja iz skupa svih mogućih ruta ima najmanje zagušenje (ruta na kojoj je najveći broj slobodnih talasnih dužina). LCR algoritam na pojavu zahteva za uspostavljanje puta svetlosti pretražuje skup ruta kandidata proračunavajući za svaku od njih cenu koja se određuje na osnovu stepena zagušenosti rute. Ukoliko više ruta ima istu cenu, preferentna je ruta sa manjim brojem hopova.

U trećoj klasi algoritama (ER), ruta za uspostavljanje puta svetlosti između datog para čvorova bira se iz skupa svih mogućih ruta bez ograničenja. Ovaj algoritam koristi informacije o stanju mreže u formi grafa koji se ažurira dinamički u skladu sa promenom saobraćajnih zahteva. Na pojavu zahteva za uspostavljanje puta svetlosti pretražuje se ceo skup mogućih ruta za dati par čvorova p dok se ne iscrpe sve mogućnosti, a preferentna ruta se bira na osnovu cene rute po nekom od kriterijuma. Nedostatak ovog algoritma je relativno velika kompleksnost i dužina vremena potrebna za izbor preferentne rute i pripadajuće

talasne dužine. Pogodniji je za implementaciju u slučaju centralizovane kontrole nego distribuirane.

Svi prethodno navedeni algoritmi nezavisno biraju prvo rutu pa talasnu dužinu (moguće je i obrnutim redom) za uspostavljanje puta svetlosti između para čvorova. Za razliku od njih, moguće je primeniti i algoritme sa zajedničkom selekcijom talasne dužine i rute (JWR, joint wavelength-route selection). JWR algoritmi na osnovu cene svakog para ruta-talasna dužina biraju par sa najmanjom cenom. Cena para je funkcija različitih faktora kao što su stanje iskorišćenosti talasne dužine u mreži, broj hopova ili njihova dužina, broj slobodnih talasnih dužina na ruti i sl. Funkcija cene se može definisati tako da kao preferentnu rutu da onu sa npr. najmanje korišćenom talasnom dužinom i najvećim brojem hopova. JWR koristi alternativni pristup (AR), što znači da se za svaki par čvorova unapred odredi skup ruta kandidata kao podskup svih mogućih ruta za dati par, i kombinuje prednosti FAR i LCR algoritama.

Najjednostavnija klasifikacija algoritama izbora talasne dužine može se izvršiti prema redosledu po kome se traži slobodna talasna dužina za vezu. Talasna dužina može biti izabrana kao najviše korišćena (MU, most-used), kao najmanje korišćena (LU, least-used), po fiksnom redosledu (FF, first-fit), ili slučajnim redosledom (RN, random-order).

Algoritam u kome se talasna dužina bira po kriterijumu najviše korišćene (MU) pretražuje skup talasnih dužina po opadajućem redosledu u odnosu na broj linkova na kojima se svaka od njih koristi. Za primenu ove klase algoritama potrebno je znati trenutno ili procenjeno stanje u mreži da bi se odredila upotreba svake talasne dužine. Pogodan je za centralizovanu implementaciju kontrole.

U LU algoritmu preferentna je ona talasna dužina koja se koristi na najmanjem broju linkova u mreži, tj. pretraživanje se vrši po rastućem nizu. Njegovom primenom bi trebalo da se za izabranu talasnu dužinu pronađe kraća ruta u poređenju se onom koja bi se dobila primenom MU algoritma. I u ovom slučaju je neophodno znati stanje mreže ili njegoja procena da bi se odredila upotreba svake od talasnih dužina i pogodan je za centralizovanu implementaciju kontrole.

Algoritam FF pretražuje talasne dužine po unapred utvrđenom fiksnom redosledu, a preferentna za uspostavljanje veze je prva slobodna na koju se naiđe. Za primenu ovog algoritma nije potrebno znati stanje mreže, a pogodan je kako za centralizovanu tako i za distribuiranu implementaciju kontrole.

Redosled pretraživanja talasnih dužina u RN algoritmu je slučajna, a preferentna je prva slobodna na koju se naiđe. Kao i u FF algoritmu nije potrebno znati stanje mreže jer faktor iskorišćenosti nema uticaj na pravilo pretraživanja. Pogodan je i za centralizovanu i za distribuiranu implementaciju kontrole.

IV. NAČINI REŠAVANJA RWA PROBLEMA

Za rešavanje statičkih i dinamičkih RWA problema mogu se generalno primeniti dva pristupa. Jedan pristup podrazumeva integralno (objedinjeno) rešavanje RWA problema, dok se drugim pristupom problem RWA rešava dekompozicijom na sastavne potprobleme (potproblem

rutiranja i potproblem dodele talasne dužine) koji se zatim nezavisno rešavaju proizvoljnim redosledom. Bitno je istaći da performanse koje se postižu primenom pojedinih algoritama suštinski zavise od primenjenog načina i redosleda rešavanja posmatranih potproblema. U literaturi je predložen veoma veliki broj algoritama za rešavanje RWA problema koji se baziraju na primeni različitih metoda: egzaktnih, aproksimativnih i heurističkih / metaheurističkih.

Egzaktni pristup zasniva se na rešavanju ILP formulacija statičkog RWA problema. Ukoliko se rešenje ovog problema može odrediti (NP-težak problem) to garantuje da je dobijeno RWA rešenje optimalno. Moguće je definisati različite kriterijumske funkcije ILP optimizacionog problema, kao na primer minimizirati potreban broj talasnih dužina za uspostavljanje svih zahtevanih puteva svetlosti u datoj mreži (MinRWA problem) ili maksimizirati broj uspostavljenih puteva svetlosti za raspoloživi broj talasnih dužina u mreži (MaxRWA problem). Primena egzaktnih tehnika je zbog računarske složenosti rešavanja ILP problema ograničena samo na mreže manjih dimenzija.

Aproksimativne metode zasnovane na primeni ILP relaksacionih tehnika pronalaze rešenja koja su bliska ili eventualno jednaka optimalnom rešenju, ali se do njih može značajno lakše doći. Za heurističko rešavanje problema se, osim brojnih posebno predloženih RWA algoritama, mogu koristiti i opšte metaheurističke metode namenjene za rešavanje složenih kombinatornih problema, kao što su simulirano kaljenje (SA, Simulated Annealing), genetski algoritmi (GA, Genetic Algorithms) ili tabu pretraživanje (TS, Tabu Search).

Poslednjih godina u svetu su postale veoma aktuelne i metaheurističke tehnike razvijene po izvesnim analogijama sa principima kolektivne inteligencije (SI, Swarm Intelligence) kolonija socijalnih insekata u prirodi (mrava, pčela, termite i dr.). Za rešavanje RWA problema (statičkih i dinamičkih) uglavnom primenjivana SI metaheuristika je optimizacija kolonijom mrava (ACO, Ant Colony Optimisation). Osnovni principi primene ACO metaheuristike za rešavanje RWA problema detaljno su objašnjeni u [4]. Autori ovog rada predložili su nedavno i novi metaheuristički algoritam za rešavanje statičkog Max-RWA problema baziran na metaheuristici optimizacija kolonijom pčela (BCO, Bee Colony Optimisation) [5]. U odeljku V dati su rezultati primene predloženog BCO-RWA algoritma za rešavanje statičkog RWA problema na nekim primerima topologija optičkih mreža.

V. ISTRAŽIVANI PROBLEMI I REZULTATI

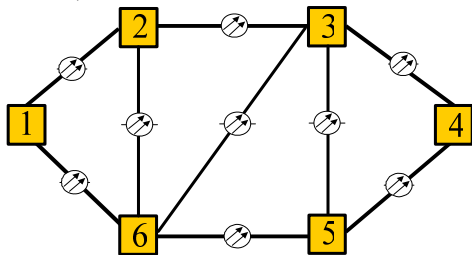
U ovom odeljku biće prikazani deo rezultata istraživanja koji se odnose na rešavanje statičkih i dinamičkih RWA problema do kojih su autori rada došli primenjujući egzaktne, heurističke i metaheurističke metode. Prikazani rezultati istraživanja odnose se na rešavanje sledećih problema:

- optimalno (egzaktno) rešavanje ILP formulacija statičkog Max/Min RWA problema,

- rešavanje statičkog MaxRWA problema primenom BCO metaheuristike,
- rešavanje dinamičkih RWA problema primenom algoritama fiksnog rutiranja, fiksnog alternativnog rutiranja, rutiranja po ruti sa najmanjom cenom, višekriterijumskog rutiranja i rerutiranja talasnih dužina.

A. Statički RWA problemi

Statički RWA problem kojim se maksimizira broj uspostavljenih puteva svetlosti u mreži (MaxRWA) za dati broj talasnih dužina može se matematički formulisati preko ILP zadatka prikazanog u [6, 7, 17]. Na osnovu date ILP formulacije razvijen je softver za optimalno rešavanje problema rutiranja i dodele talasnih dužina. Razvijeni softver pruža mogućnost optimalnog rešavanja MaxRWA problema u mrežama različitih topologija i za različite saobraćajne scenarije. Kao ulazni parametri za ovaj softver koriste se fizička topologija mreže, matrica saobraćajnih zahteva između pojedinih parova čvorova (izvorni-odredišni) i broj raspoloživih talasnih dužina po linkovima. Izlazni rezultat predstavlja ukupan broj ostvarenih puteva svetlosti (optimalno izabrani linkovi preko kojih se rutiraju putevi svetlosti i njihove dodeljene talasne dužine).



Sl. 1. Primer topologije optičke WDM mreže

Sprovedeni su brojni numerički eksperimenti za rešavanje MaxRWA problema u mrežama različitih topologija (do desetak čvorova i linkova). Radi ilustracije ovde će biti prikazana dobijena rešenja MaxRWA problema za topologiju optičke mreže prikazane na Slici 1 i slučajno generisanu matricu saobraćajnih zahteva D sa najviše 3 zahtevana puta svetlosti za svaki par čvorova u mreži:

i/j	1	2	3	4	5	6
1	0	2	1	1	2	2
2	2	0	1	3	1	3
3	1	1	0	1	2	1
4	1	3	1	0	2	3
5	2	1	2	2	0	1
6	2	3	1	3	1	0

U datoj matrici ukupan broj zahtevanih puteva svetlosti iznosi 52. U Tabeli 1 prikazani su rezultati za uspostavljeni broj puteva svetlosti u funkciji broja raspoloživih talasnih dužina po linkovima. Pokazuje se da se svih 52 zahtevanih puteva svetlosti može ostvariti ukoliko se u mreži koristi najmanje 5 talasnih dužina. Takođe, u istoj tabeli naveden je i podatak o potrebnom procesorskom (CPU) vremenu za dobijanje rešenja, kao i broj LP iteracija, binarnih promenljivih i ukupan broj ograničenja u postupku optimizacije. Sva testiranja sprovedena su korišćenjem računarskog procesora *Intel(R) Pentium(R)* na 1.73GHz, sa 512MB RAM-a.

Tabela 1. Poređenje rezultata i kompleksnosti problema

Broj talasn. dužina	Broj ostvarenih puteva svetlosti	CPU vreme [s]	Broj LP iteracija	Broj promenljivih	Broj ograničenja
1	18	8	1427	1040	1348
2	31	66	6239	2028	2614
3	42	279	18115	3016	3880
4	48	369	18433	4004	5146
5	52	1312	48234	4992	6412

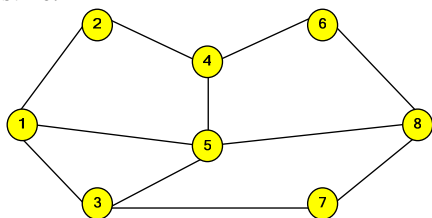
U Tabeli 2 prikazana su rešenja MaxRWA problema koja pokazuju optimalno određene rute i dodeljene talasne dužine svih zahtevanih puteva svetlosti u posmatranoj optičkoj WDM mreži.

Tabela 2. Optimalno rešenje MaxRWA problema

Red. br. konekcije	Par čvorova (i,j)	Izabrana ruta	Dodeljena talasna dužina
1	(2,1)	2 → 1	1
2	(2,1)	2 → 1	5
3	(3,1)	3 → 6 → 1	1
4	(4,1)	4 → 3 → 2 → 1	2
5	(5,1)	5 → 6 → 1	2
6	(5,1)	5 → 6 → 1	4
7	(6,1)	6 → 1	3
8	(6,1)	6 → 1	5
9	(1,2)	1 → 2	4
10	(1,2)	1 → 2	1
11	(3,2)	3 → 2	5
12	(4,2)	4 → 5 → 6 → 2	1
13	(4,2)	4 → 5 → 3 → 6 → 2	2
14	(4,2)	4 → 3 → 2	1
15	(5,2)	5 → 3 → 2	4
16	(6,2)	6 → 2	5
17	(6,2)	6 → 2	4
18	(6,2)	6 → 2	3
19	(1,3)	1 → 2 → 3	3
20	(2,3)	2 → 6 → 3	1
21	(4,3)	4 → 3	5
22	(5,3)	5 → 6 → 3	5
23	(5,3)	5 → 3	5
24	(6,3)	6 → 3	4
25	(1,4)	1 → 6 → 5 → 4	2
26	(2,4)	2 → 3 → 4	4
27	(2,4)	2 → 6 → 3 → 4	2
28	(2,4)	2 → 3 → 4	5
29	(3,4)	3 → 4	1
30	(5,4)	5 → 4	3
31	(5,4)	5 → 4	1
32	(6,4)	6 → 5 → 4	5
33	(6,4)	6 → 5 → 4	4
34	(6,4)	6 → 3 → 4	3
35	(1,5)	1 → 2 → 3 → 5	2
36	(1,5)	1 → 6 → 5	1
37	(2,5)	2 → 3 → 5	1
38	(3,5)	3 → 5	4
39	(3,5)	3 → 5	3
40	(4,5)	4 → 5	5
41	(4,5)	4 → 5	4
42	(6,5)	6 → 5	3
43	(1,6)	1 → 2 → 6	5
44	(1,6)	1 → 6	5
45	(2,6)	2 → 6	4
46	(2,6)	2 → 1 → 6	4
47	(2,6)	2 → 6	3
48	(3,6)	3 → 6	5
49	(4,6)	4 → 3 → 6	4
50	(4,6)	4 → 5 → 6	3
51	(4,6)	4 → 3 → 6	3
52	(5,6)	5 → 3 → 2 → 1 → 6	3

Dualni problem, kojim se minimizira potreban broj talasnih dužina tako da svi zahtevani putevi svetlosti u mreži budu uspostavljeni (MinRWA) rešavan je u [8]. U radu je data matematička ILP formulacija MinRWA problema na osnovu koje je razvijen softver za optimalno rešavanje problema. Za razliku od ILP formulacije MaxRWA problema korišćene u [7] u kojoj su binarne promenljive definisane na nivou pojedinačnih linkova, u formulaciji korišćenoj u [8] celobrojne promenljive definisane su na nivou ruta, što značajno smanjuje broj promenljivih koje figurišu u ILP formulaciji. Međutim, rešenja koje se na ovaj način određuju mogu biti suboptimalna, s obzirom da se kod ovakve formulacije zahteva da potencijalne rute za uspostavljanje puteva svetlosti budu unapred prethodno definisane. Rešavanjem MinRWA problema na istom primeru topologije optičke mreže i za iste saobraćajne zahteve kao u slučaju MaxRWA problema, pokazuje se da minimalan potreban broj talasnih dužina u mreži za uspostavljanje svih 52 zahtevanih puteva svetlosti u ovom slučaju iznosi 8, što predstavlja lošije (suboptimalno) rešenje u odnosu na rezultat dobijen rešavanjem ILP formulacije MaxRWA problema. U primenjenoj ILP formulaciji MaxRWA problema, dimenzionalnost problema (broj binarnih promenljivih i broj ograničenja) rapidno se uvećava sa porastom broja čvorova, linkova, raspoloživih talasnih dužina i broja zahtevanih puteva svetlosti u mreži. Usled toga, optimalno rešenje RWA problema moguće je dobiti samo u slučaju mreža manjih dimenzija i sa manjim brojem zahtevanih puteva svetlosti. U slučaju problema većih dimenzija neophodno je koristiti aproksimativne optimizacione tehnike ili neke od raspoloživih (meta)heurističkih metoda za rešavanje složenih kombinatornih problema.

BCO je nova metaheuristička SI tehnika, koju su nedavno razvili Teodorović i Lučić u cilju rešavanja složenih kombinatornih optimizacionih problema. Osnovni koncepti BCO metaheuristike opisani su u [9, 17]. U [5] autori ovog rada predložili su novi (BCORWA) algoritam za rešavanje statičkog MaxRWA problema u optičkoj mreži zasnovan na primeni BCO metaheuristike. Ovde će biti prikazan deo rezultata koji se odnose na rešavanje MaxRWA problema primenom BCO metaheuristike.



Sl. 2. Primer topologije optičke mreže sa 8 čvorova

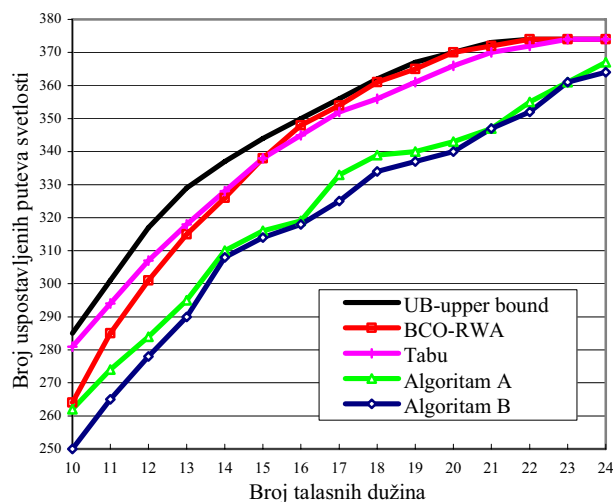
U Tabeli 3 prikazani su rezultati rešavanja MaxRWA problema na jednom primeru topologije optičke WDM mreže sa 8 čvorova (Slika 2), dobijeni egzaktnim rešavanjem ILP formulacije MaxRWA problema i primenom heurističkog BCORWA algoritma.

Na osnovu rezultata prikazanih u Tabeli 3 može se videti da se za različite saobraćajne scenarije primenom BCORWA algoritma mogu dobiti rešenja koja su veoma

bliska (odstupaju najviše do 7%) odnosno jednaka optimalnim (ILP) rešenjima, pri čemu su potrebna CPU vremena značajno manja u odnosu na egzaktno rešavanje MaxRWA problema.

Tabela 3. Poređenje BCORWA i optimalnih (ILP) rešenja

Ukupan broj zahtevanih puteva svetl.	Broj talasnih dužina	Broj uspostavljenih puteva svetlosti		Potrebno CPU vreme [s]		Relativno odstupanje [%]
		ILP	BCO-RWA	ILP	BCO-RWA	
28	1	14	14	4	4.33	0
	2	23	23	94	4.58	0
	3	27	27	251	4.68	0
	4	28	28	313	4.66	0
31	1	15	14	4	4.73	6.67
	2	25	25	83	5.00	0
	3	30	30	235	5.19	0
	4	31	31	1410	5.21	0
34	1	15	14	14	5.19	6.67
	2	27	26	148	5.50	3.70
	3	33	33	216	5.64	0
	4	34	34	906	5.64	0
36	1	16	15	23	5.64	6.25
	2	27	26	325	6.09	3.70
	3	34	34	788	6.11	0
	4	36	36	1484	6.13	0
38	1	17	16	16	5.67	5.88
	2	28	27	247	6.09	3.57
	3	35	35	261	6.23	0
	4	38	38	1773	6.33	0
40	1	17	16	31	6.00	5.88
	2	28	27	491	6.28	3.57
	3	35	35	429	6.61	0
	4	40	40	1346	6.67	0



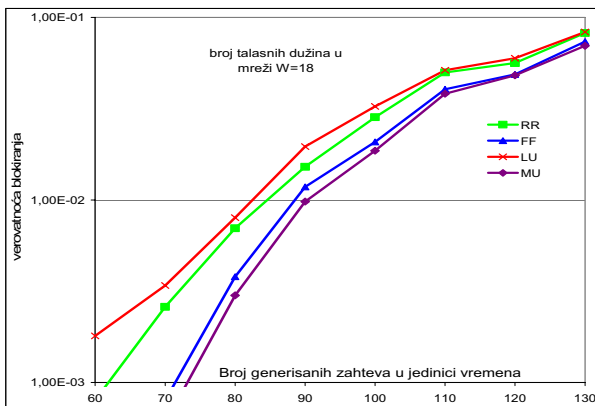
Sl. 3. Poređenje rezultata BCORWA sa drugim RWA algoritmima za EON mrežu

BCORWA algoritam je testiran i na primeru realne EON (European Optical Network) optičke mreže sa 20 čvorova i 39 linkova, a efikasnost ovog algoritma upoređena je sa nekim drugim ranije predloženim RWA algoritmima (Slika 3). Pokazuje se da predloženi BCORWA algoritam može da obezbedi značajno bolje performanse – veći broj uspostavljenih puteva svetlosti u odnosu na dva RWA algoritma (A i B) ranije predložena u [10], koji se zasnivaju na aproksimativnom rešavanju ILP formulacija. Osim toga, predloženi BCORWA algoritam obezbeđuje poboljšanje performansi u mreži u odnosu na skorije predloženi metaheuristički algoritam tabu pretraživanja [15] u slučajevima većeg broja raspoloživih talasnih dužina u mreži, odnosno veće kompleksnosti rešavanog problema. Svi prikazani rezultati odnose se na istu topologiju EON mreže i istu saobraćajnu matricu sa ukupno 374 zahtevana puta svetlosti.

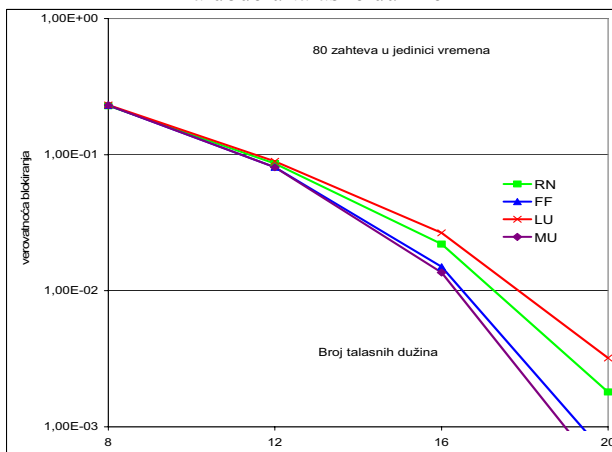
B. Dinamički RWA problemi

U nastavku će biti prikazani neki rezultati istraživanja vezani za rešavanje RWA problema u slučaju dinamičkih saobraćajnih zahteva. Osnovni cilj pri rešavanju dinamičkih RWA problema je minimizirati verovatnoću blokiranja zahteva. Da bi se taj cilj ostvario istraživana je efikasnost nekih potencijalnih algoritama za rešavanje problema rutiranja i dodele talasnih dužina u mrežama sa kontinuitetom talasne dužine.

U [16] je rešavan dinamički RWA problem uz primenu fiksnog rutiranja i različitih metoda za dodelu talasne dužine (opisanih ranije u poglavlju III) na primeru topologije optičke mreže prikazane na slici 2. Simuliran je dinamički scenario saobraćaja sa 5000 generisanih zahteva, pri čemu je broj zahteva u jedinici vremena variran u granicama od 60 do 130. Pretpostavljena je situacija da na početku simulacije u mreži već postoje neki uspostavljeni putevi svetlosti koji zauzimaju resurse (talasne dužine) na pojedinim linkovima. Rezultati simulacije ilustrovani su na slikama 4 i 5.



Sl. 4 Verovatnoća blokiranja pri primeni različitih metoda za dodelu talasne dužine



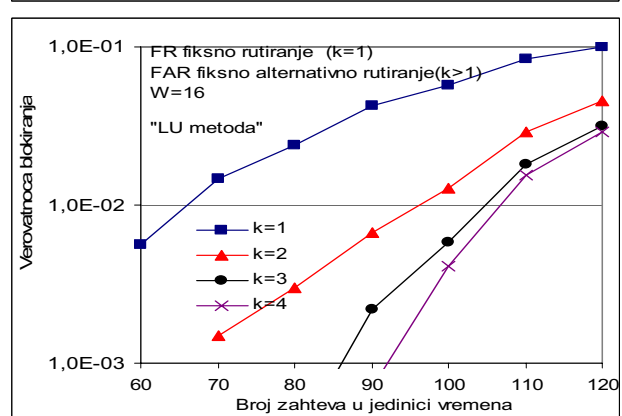
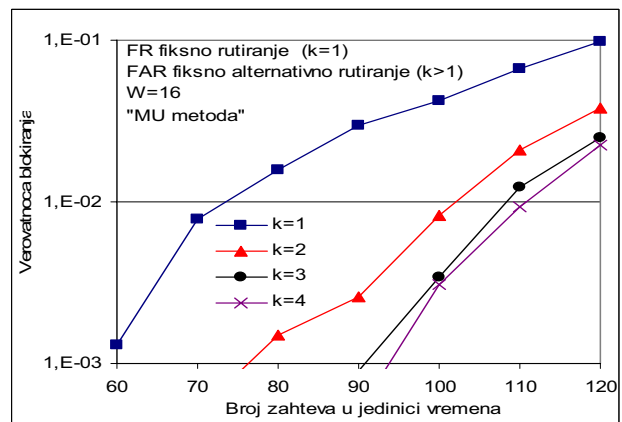
Sl. 5 Zavisnost verovatnoće blokiranja od broja talasnih dužina u mreži

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 4 može se zaključiti da se pri različitim vrednostima intenziteta saobraćaja u mreži najmanja verovatnoća blokiranja zahteva postiže primenom *MU* metode. Metoda prve raspoložive talasne dužine (*FF*) daje približno iste rezultate kao i *MU* metoda, pri čemu je njena osnovna prednost u tome što ne zahteva procenu stanja u mreži u trenutku nailaska zahteva. Ostale dve istraživane metode (*LU* i *RN*) pokazuju lošije rezultate u pogledu verovatnoće

blokiranja zahteva u poređenju sa *MU* i *FF* metodom. Na slici 5 prikazana je zavisnost verovatnoće blokiranja zahteva u posmatranoj mreži za različite posmatrane algoritme za dodelu talasnih dužina i pri različitom broju raspoloživih talasnih dužina na linkovima. Sa ove slike, jasno se može videti da primenjeni algoritam za dodelu talasne dužine nema praktičnog uticaja u situacijama kada je broj raspoloživih talasnih dužina u mreži suviše mali. U takvim situacijama, s obzirom da potrebni resursi u mreži nisu adekvatno dimenzionisan za dati saobraćaj, dolazi do čestih blokiranja zahteva. Međutim, sa povećanjem broja talasnih dužina u mreži, prednosti *MU* i *FF* metoda postaju jasno izražene.

U [11] je rešavan dinamički RWA problem uz primenu fiksnog alternativnog rutiranja i različitih metoda za dodelu talasne dužine (opisanih ranije u poglavlju III) na primeru topologije optičke mreže prikazane na slici 2. Simuliran je dinamički scenario saobraćaja sa ukupno 10000 generisanih zahteva.

Dobijeni rezultati pokazuju da fiksno alternativno rutiranje (*FAR*) doprinosi značajnom smanjenju verovatnoće blokiranja zahteva u odnosu na metod fiksnog rutiranja (*FR*), što se može sagledati na osnovu rezultata prikazanih na slici 6. Prikazani rezultati se odnose na slučaj alternativnog rutiranja sa različitim brojem prethodno definisanih ruta za svaki par čvorova u posmatranoj mreži. Dobijeni rezultati pokazuju da povećanje broja alternativnih ruta iznad 3 ne doprinosi značajnom smanjenju verovatnoće blokiranja zahteva u mreži.

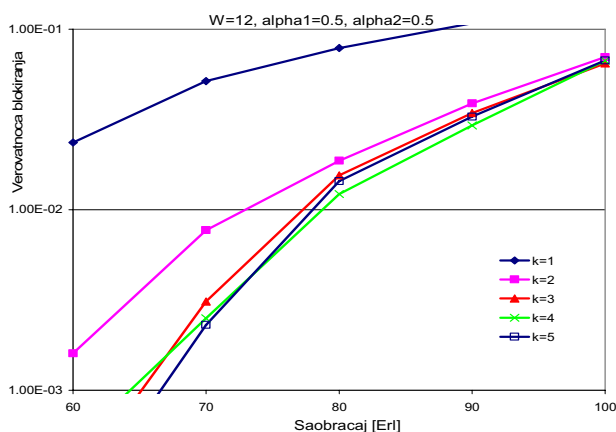


Sl. 6. Poređenje FR i FAR algoritama rutiranja uz primenu *MU* i *LU* metoda za dodelu talasne dužine

U [12] je istraživana efikasnost primene heurističkog *MinCost* RWA algoritma, zasnovanog na pristupu

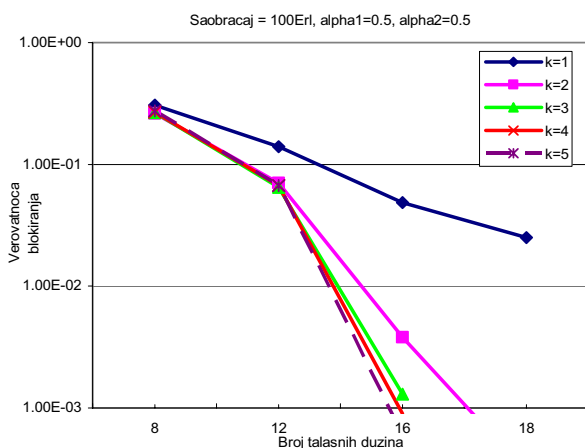
alternativnog rutiranja, u kojem se odluka o izboru rute-talasne dužine za uspostavljanje zahtevanog puta svetlosti donosi na osnovu proračunavanja cena svih potencijalnih parova (ruta, talasna dužina) i izborom para sa minimalnom cenom. Cena svakog para (ruta, talasna dužina) definisana je preko sledećih parametara: trenutnog stepena korišćenosti talasne dužine u mreži, trenutnog broja slobodnih talasnih dužina na posmatranoj ruti i dužine rute (izražene brojem fizičkih linkova na posmatranoj ruti). Izborom pogodnih vrednosti odgovarajućih težinskih faktora (α_1, α_2) moguće je dati manji ili veći značaj pojedinim parametrima koji određuju ukupnu cenu parova (ruta, talasna dužina), čime se može postići kombinacija prednosti koje pružaju MU, FAR i LCR algoritmi. Izvršena je simulacija dinamičkog RWA problema na primeru optičke mreže čija je topologija prikazana na slici 2. Broj puteva svetlosti u sprovedenoj simulaciji je ograničen na 10000 zahteva, Zahtevi se generišu između pojedinih parova čvorova sa uniformnom verovatnoćom.

Na slici 7 prikazani su rezultati za verovatnoću blokiranja zahteva u funkciji ukupnog saobraćajnog opterećenja u mreži za slučaj kada je broj talasnih dužina u mreži $W=12$. Slučaj $k=1$ odgovara algoritmu fiksnog rutiranja.



Sl. 7. Zavisnost verovatnoće blokiranja od saobraćaja u mreži

Na vrednost verovatnoće blokiranja značajno utiče broj raspoloživih talasnih dužina u mreži, što je prikazano na slici 8.



Sl. 8. Zavisnost verovatnoće blokiranja od broja raspoloživih talasnih dužina u mreži

U [13] je istraživan problem višekriterijumskog rutiranja za određivanje skupa dominantnih ruta (iz skupa svih mogućih ruta) koje se mogu koristiti za uspostavljanje puta svetlosti pri rešavanju dinamičkih RWA problema. Za put se kaže da je dominantan ukoliko ne postoji ni jedan drugi put koji bi od njega bio bolji bar po jednom kriterijumu, a istovremeno ne bi bio gori po nekom od ostalih kriterijuma (Pareto optimizacija). U predloženom algoritmu višekriterijumskog rutiranja, u obzir se uzimaju sledeći kriterijumi pri određivanju skupa dominantnih ruta: broj hopova, broj slobodnih talasnih dužina i verovatnoća blokiranja zahteva. Prvi i treći kriterijum je potrebno minimizirati, a drugi maksimizirati pri određivanju skupa optimalnih puteva.

Primenjeni višekriterijumski algoritam baziran je na konceptu obeležavanja čvorova po iteracijama. Za predloženi algoritam razvijen je softver koji pronalazi skup dominantnih puteva koji se mogu koristiti za uspostavljanje puta svetlosti između posmatranog para čvorova u mreži. Ulazni parametri ovog softvera su fizička topologija mreže, broj slobodnih talasnih dužina na pojedinim linkovima i verovatnoća blokiranja zahteva na svakom linku u mreži.

Problem neefikasnog korišćenja resursa u WRON mrežama, koji je posledica zahteva da postoji kontinuitet talasne dužine svetlosnog puta, može se rešavati i primenom algoritama rerutiranja talasnih dužina. Suština ove procedure zasniva se na ideji da se raspoloživa fizička ruta (sa kontinuitetom talasne dužine) za uspostavljanje novog puta svetlosti, može dobiti premeštanjem (rerutiranjem) nekih postojećih puteva svetlosti na novu talasnu dužinu, uz zadržavanje njihove fizičke rute. Efikasnost postupka rerutiranja talasnih dužina istraživana je u radu [14].

Rezultati sprovedenih simulacija pokazuju da se performanse mreže, izražene brojem blokiranih puteva svetlosti, mogu unaprediti primenom procedure rerutiranja talasnih dužina.

Pri rerutiranju talasnih dužina neophodno je da premeštanje puteva svetlosti na nove talasne dužine prouzrokuje minimum poremećaja s obzirom na to da svaka talasna dužina nosi veliki saobraćaj. Algoritmi rerutiranja treba da izaberu samo nekoliko svetlosnih puteva za premeštanje, a moraju biti i jednostavni da bi mogli da se koriste u uslovima veoma dinamičnih promena saobraćaja. Primena rerutiranja talasnih dužina umanjuje i posledice otkaza pojedinih komponenata mreže, jer se u takvim slučajevima premeštanjem nekoliko svetlosnih puteva na nove talasne dužine može sprečiti blokiranje.

Rerutiranje talasnih dužina obuhvata samu operaciju rerutiranja i algoritam rerutiranja. Operacija rerutiranja treba da je takva da period prekida bude što kraći i da kontrola komutacije u čvorovima rutiranja bude što jednostavnija. Algoritam rerutiranja, kojim se određuju svetlosni putevi za rerutiranje i biraju oni koji će uspostaviti rutu sa kontinuitetom talasne dužine, treba da je takav da se može izvršiti u kratkom vremenskom intervalu i da minimizira broj postojećih svetlosnih puteva koji se rerutiraju.

VI. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati istraživanja različitih potencijalnih pristupa i algoritama koji se mogu primenjivati za dizajniranje i optimizaciju korišćena resursa u potpuno optičkim mrežama sa rutiranjem po talasnim dužinama (WRON). Pronalaženje "dobrog" algoritma za rešavanje RWA problema je od suštinske važnosti za efikasno korišćenje raspoloživih resursa. RWA predstavlja izuzetno kompleksan i izazovan problem koji je potrebno rešavati ka tom cilju. U radu su istraživani statički i dinamički RWA problemi.

Za potrebe verifikacije i uporedne analize rešenja u sprovedenim istraživanjima primenjivane su metode matematičke analize i simulacije. U mrežama manjih dimenzija (do 10-tak čvorova) egzaktnim rešavanjem odgovarajućih ILP formulacija dobijeno je optimalno rešenje RWA problema, dok je za rešavanje istog problema u mrežama realnih dimenzija razvijen novi heuristički RWA algoritam zasnovan na BCO metaheuristici. Rezultati dobijeni na osnovu sprovedenih testiranja pokazuju da se primenom predloženog BCO-RWA algoritma mogu dobiti rešenja veoma bliska ili čak jednaka optimalnim (u mrežama manjih dimenzija), dok su u mrežama realnih dimenzija rešenja bliska graničnim (UB, Upper Bound) vrednostima. Pokazuje se da se primenom BCO-RWA algoritma mogu postići značajna poboljšanja u poređenju sa nekim drugim ranije predloženim RWA algoritmima.

Za potrebe rešavanja dinamičkih RWA problema testirana je efikasnost primene različitih potencijalnih algoritama rutiranja i dodele talasnih dužina na nekim primerima topologija optičkih mreža. Dobijeni rezultati pokazuju da algoritmi alternativnog rutiranja (FAR i MinCost) sa $k=2$ alternativne rute doprinose značajnom smanjenju verovatnoće blokiranja u odnosu na algoritme fiksnog rutiranja (FR). Takođe, pokazuje se da MU metoda za dodelu talasne dužine obezbeđuje najmanju verovatnoću blokiranja pri različitim vrednostima saobraćaja u mreži, broja raspoloživih talasnih dužina i broja potencijalnih ruta za uspostavljanje puteva svetlosti. Slične performanse sa MU metodom obezbeđuje i FF metoda, dok se lošije performanse postižu primenom RN i LU metoda. Osim primene "dobrih" RWA algoritama, za unapređenje performansi WRON mreže mogu se primenjivati i drugi pristupi, kao što je rerutiranje talasnih dužina, korišćenje više vlakana po linku ili primena konvertora talasnih dužina. U okviru istraživanja koja se sprovode sa ciljem optimizacije korišćenja resursa WRON mreža autori su posebno testirali efikasnost primene tehnike rerutiranja talasnih dužina.

Pored fundamentalnog RWA problema, za dizajniranje i efikasno korišćenje raspoloživih resursa istraživani su i drugi optimizacioni problemi koji u sebi sadrže i RWA problem, kao što su: dizajniranje logičke topologije mreže i rekonfiguracija logičke topologije usled promene saobraćaja i usled otkaza komponenata u mreži. Sprovedena su testiranja različitih potencijalnih algoritama i utvrđeno je da se njihovom primenom može postići efikasnije korišćenje resursa u optičkoj mreži, a time i unapređenje ukupnih performansi mreže.

LITERATURA

- [1] C. S. Ram Murthy, M.Gurusamy, WDM Optical Networks - Concepts, Design and Algorithms, Prentice Hall, 2002.
- [2] V. Ćimović-Raspopović, G. Marković, Rutiranje u optičkim mrežama sa talasnim multipleksiranjem; Zbornik radova konferencije TELFOR 2003 CD izdanje, nov. 2003; Beograd, www.telfor.org.yu.
- [3] H. Zang, J. P. Jue, and B. Mukherjee, "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks," *SPIE Opt. Netw. Mag.*, vol. 1, pp. 47-60, Jan. 2000.
- [4] D. Teodorović, G. Marković, "Rutiranje u optičkim mrežama primenom algoritama inspirisanih ponašanjem mrava", *Zbornik radova konf. PosTel*, Beograd 2005, str.271-280.
- [5] G. Marković, D. Teodorović, V. Ćimović - Raspopović, "Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks Based on the Bee Colony Optimization", rad prihvaćen za objavljivanje u *AICOM (The European Journal on Artificial Intelligence)*.
- [6] G. Marković, V. Ćimović-Raspopović, D. Teodorović, "Optimalno rutiranje i dodela talasnih dužina u optičkim mrežama", *Zbornik radova 50 konf. ETRAN*, Beograd 2006, str. 120-123.
- [7] G. Marković, V. Ćimović-Raspopović "Optimalno uspostavljanje puteva svetlosti u optičkim WDM mrežama", Zbornik radova konferencije TELFOR 2006 - CD izdanje, nov. 2006; Beograd, www.telfor.org.yu
- [8] G. Marković, V. Ćimović-Raspopović, "Optimal Solution for Routing and Wavelength Assignment Problem in Optical WDM Networks", *Proceedings of ICEST Conference*, Niš 2005, Vol.1 , pp.289-292.
- [9] 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.
- [10] R.M. Krishnaswamy and K.N. Sivarajan, "Algorithms for routing and wavelength assignment based on solutions of LP-relaxation," *IEEE Commun. Lett.*, Vol. 5. No.10, pp.435-437, October 2001.
- [11] G. Marković, V. Ćimović-Raspopović, "The blocking probability comparison for some routing and wavelength assignment methods", *Proceedings of ICEST Conference 2007*, Vol.1, June 2007, Ohrid, Macedonia, pp.27-30.
- [12] G. Marković, V. Ćimović-Raspopović, D. Teodorović "An application of heuristic algorithm based on route minimum cost for RWA in all-optical WDM networks", *Proc. of IEEE Conference TELSIKS 2007*, Niš 2007, Vol.2 , pp.397-400.
- [13] G. Marković, V. Ćimović-Raspopović, "An Adaptive Multi-Criteria Routing Algorithm for Wavelength Routed Optical networks", *Proceedings of IEEE Conf. EUROCON*, 2005, pp. 1353-1356.
- [14] G. Marković, V. Ćimović-Raspopović, "A Procedure of Wavelength Rerouting in Optical WDM Networks", *Proc. of IEEE Conference TELSIKS 2005*, Vol.1, pp.303-306. Niš 2005.
- [15] C. Dzongang, P. Galinier, S. Pierre, "A Tabu search heuristic for the routing and wavelength assignment problem in optical networks," *IEEE Commun. Lett.*, Vol. 9, No. 5, May 2005, pp. 426-428.
- [16] G. Marković, V. Ćimović-Raspopović, "Verovatnoća blokiranja u optičkim WDM mrežama sa rutiranjem po talasnim dužinama: poređenje nekih metoda", *Zbornik radova konf. ETRAN*, Herceg Novi 2007.
- [17] G. Marković, "Optimizacija korišćenja resursa u optičkim mrežama sa rutiranjem po talasnim dužinama", doktorska disertacija, Saobraćajni fakultet, Beograd, 2007.

ABSTRACT

The goal of this paper is to study some possible approaches and algorithms for design and optimization of resource usage in wavelength-routed optical networks (WRON). A crucial task to achieve this is to solve the fundamental routing and wavelength assignment problem (RWA). Finding a „good“ RWA solution is essential, because it directly influences the efficiency of network resources usage and therefore the overall network performances.

APPLICATION OF RWA ALGORITHMS FOR RESOURCES USAGE OPTIMIZATION IN OPTICAL WDM NETWORKS

Goran Marković and Vladanka Ćimović-Raspopović