

# Rešavanje RWA problema u WDM mrežama primenom BCO metaheuristike

Goran Z. Marković, Vladanka S. Aćimović-Raspopović

**Sadržaj** — U radu se istražuje i rešava problem rutiranja i dodele talasnih dužina (RWA) pri uspostavljanju puteva svetlosti u WDM optičkoj mreži sa rutiranjem po talasnim dužinama u slučaju statičkog saobraćajnog scenarija. Za rešavanje ovog problema primenjena je metaheuristika *optimizacija kolonijom pčela* (BCO). Upoređeni su rezultati za ukupan broj uspostavljenih puteva svetlosti u slučaju primene konverzije talasnih dužina u jednom čvoru mreže u odnosu na slučaj kada se konverzija ne primenjuje i na bazi dobijenih rezultata izvedeni odgovarajući zaključci.

**Ključne reči** — konverzija talasnih dužina, optička WDM mreža, put svetlosti, rutiranje i dodela talasnih dužina.

## I. UVOD

OPTIČKE mreže bazirane na multipleksiranju po talasnim dužinama (WDM, Wavelength Division Multiplexing), smatraju se jednom od veoma obećavajućih solucija za realizaciju optičkih transportnih mreža izuzetno velikih kapaciteta. WDM optička mreža sastoji se od određenog broja čvorova međusobno povezanih optičkim linkovima po kojima se ostvaruje prenos optičkih signala na većem broju talasnih dužina po jednom optičkom vlaknu. U čvorovima optičke mreže nalazi se odgovarajuća oprema za procesiranje signala u optičkom ili elektronskom domenu. Krajnji cilj u evoluciji optičkih transportnih mreža je potpuno optička mreža (AON, all optical network) u kojoj se putevi svetlosti od izvornog do odredišnog čvora uspostavljaju potpuno u optičkom domenu (bez O/E/O konverzije), uz rutiranje/komutaciju signala na bazi njihovih talasnih dužina. Ovakve mreže su poznate pod nazivom optičke mreže sa rutiranjem po talasnim dužinama (WRON, Wavelength Routed Optical Networks) [1].

Jedan od ključnih problema koji je potrebno rešavati pri dizajniranju ovakvih mreža odnosi se na rešavanje problema rutiranja i dodele talasnih dužina (RWA, Routing and Wavelength Assignment) putevima svetlosti. Rešavanje RWA problema je od suštinskog značaja za efikasno korišćenje resursa u optičkoj WDM mreži [2].

Prema scenariju saobraćaja u mreži, RWA problemi se mogu podeliti na dve opšte kategorije: *statičke* i

*dinamičke*. Kod *statičkih* RWA problema, skup saobraćajnih zahteva između svih parova čvorova je poznat unapred, sa mogućim promenama tokom više časova, dana ili meseci. Za razliku od *statičkih*, *dinamički* RWA problemi podrazumevaju saobraćajni scenario u kome se zahtevi za uspostavljanjem puteva svetlosti pojavljuju potpuno slučajno u vremenu i imaju slučajno vremensko trajanje.

U zavisnosti od toga da li je u čvorovima mreže omogućena konverzija talasnih dužina ili ne, putevi svetlosti se od izvornog do odredišnog čvora mogu uspostavljati na različitim ili na istoj talasnoj dužini, respektivno. U prvom slučaju (kada se u čvorovima koriste konvertori talasnih dužina) put svetlosti može biti uspostavljen korišćenjem različitih talasnih dužina na pojedinim delovima rute od izvornog do odredišnog čvora. Pri tome, putevi svetlosti koji se uspostavljaju preko zajedničkog fizičkog linka moraju zadovoljavati ograničenje različitosti talasnih dužina. U drugom slučaju (bez konverzije talasnih dužina u usputnim čvorovima) potrebno je da bude zadovoljeno i ograničenje kontinuiteta talasne dužine puteva svetlosti. Konverzija talasnih dužina je jedan od mogućih pristupa za efikasnije korišćenje resursa u optičkoj WDM mreži [3].

U radu je istraživana RWA problem u slučaju *statičkih* saobraćajnih zahteva uz mogućnost konverzije talasnih dužina u nekom od čvorova mreže. Za rešavanje RWA problema primenjena je metaheuristika *Optimizacija kolonijom pčela* (BCO, *Bee Colony Optimisation*) [4,5]

Rad je organizovan na sledeći način. U odeljku II data je postavka rešavanog problema, a u odeljku III kratko opisan BCO-RWA algoritam za rešavanje *statičkog* RWA problema kojim se maksimizira broj uspostavljenih puteva svetlosti u mreži. U četvrtom odeljku prikazani su rezultati istraživanog problema, dobijeni simulacijom na jednom posmatranom primeru optičke mreže, a u odeljku V data su zaključna razmatranja.

## II. POSTAVKA PROBLEMA

U radu se istražuje i rešava problem rutiranja i dodele talasnih dužina u optičkim WDM mrežama sa rutiranjem po talasnim dužinama u slučaju *statičkih* saobraćajnih zahteva, uz mogućnost konverzije talasnih dužina puteva svetlosti u čvorovima mreže. Cilj istraživanog problema je ispitati efikasnost primene konvertora talasnih dužina, odnosno utvrditi da li se njihovom implementacijom u pojedine čvorove može postići unapređenje saobraćajnih performansi u mreži.

Goran. Z. Marković, Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet, Vojvode Stepe 305, 11000 Beograd, Srbija; (e-mail:g.markovic@sf.bg.ac.rs).

Vladanka S. Aćimović-Raspopović, Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet, Vojvode Stepe 305, 11000 Beograd, Srbija; (e-mail:v.acimovic@sf.bg.ac.rs).

Za zadatu fizičku topologiju mreže i unapred poznate (očekivane) saobraćajne zahteve između pojedinih čvorova u mreži, potrebno je odrediti plan ruta i dodeljenih talasnih dužina putevima svetlosti, tako da se maksimizira broj uspostavljenih puteva svetlosti, pri datom broju raspoloživih talasnih dužina. Pretpostavljeno je da je na svim linkovima u mreži broj raspoloživih talasnih dužina isti i da iznosi  $W$ .

Za rešavanje opsianog problema primenjan je *BCO-RWA* algoritam, predložen u [4]. Algoritam će ukratko biti opisan u nastavku.

### III. BCO-RWA ALGORITAM

*BCO-RWA* algoritam zasnovan na metaheuristici optimizacija kolonijom pčela sprovodi se po etapama i iteracijama, pri čemu se svaka iteracija sastoji od odgovarajućeg broja etapa. Predloženi algoritam bazira se na primeni fiksnog-alternativnog rutiranja i strategiji slučajnog izbora talasne dužine (*random*) pri uspostavljanju puteva svetlosti. Cilj algoritma je da maksimizira broj uspostavljenih puteva svetlosti za dati broj talasnih dužina (*Max-RWA* problem). Algoritam se sastoji od sledećih koraka:

1. Korak – izbor posmatranog para čvorova. U ovom koraku svaka pčela nakon «poletanja iz košnice» bira na slučajan način jedan od potencijalnih *fiktivnih* čvorova. Svaki fiktivni čvor predstavlja jedan zahtevani put svetlosti kojeg treba uspostaviti između para čvorova ( $s,d$ ) u mreži.

2. Korak – obilazak  $s$  fiktivnih čvorova tokom leta unapred ( $s$  je parametar koji se unapred zadaje i predstavlja broj fiktivnih čvorova koje svaka pčela obiđe tokom jednog leta unapred). Nakon izbora jednog od fiktivnih čvorova, posmatrana pčela dalje odlučuje da izabere odgovarajuću raspoloživu rutu i talasnu dužinu na njoj. To se vrši na osnovu izračunavanja odgovarajućih *koristi pčele* da izabere određenu rutu, definisanih prema sledećem izrazu:

$$V_r^{s,d} = \left\{ a \frac{1}{h_r - h_{r,\min} + 1} + (1-a) \frac{W_r}{W_{\max}} \right. \quad (1)$$

$r$  – redni broj rute za posmatrani par čvorova ( $s,d$ ),  
 $r=1,2,\dots,k$ ,  $r \in \{R^{s,d}\}$

$h_r$  – dužina rute  $r$  izražena u broju fizičkih hopova,

$h_{r,\min}$  – dužina najkraće rute  $r$ ,

$W_r$  – broj slobodnih talasnih dužina na ruti  $r$ ,

$W_{\max}$  – maksimalni broj slobodnih talasnih dužina,

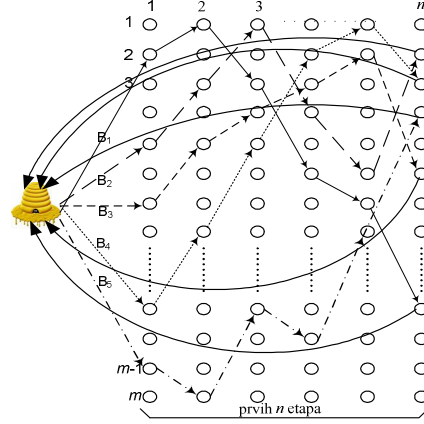
$a$  – težinski parametar,  $0 \leq a \leq 1$

Na osnovu ovako definisanih koristi, za svaku pčelu se izračunavaju verovatnoće izbora određenje rute  $r$  za posmatrani par čvorova ( $s,d$ ) na osnovu izraza:

$$p_r^{s,d} = \begin{cases} \frac{e^{V_r^{s,d}}}{\sum_{i=1}^{|R^{s,d}|} e^{V_i^{s,d}}}, & \forall r \in R^{s,d} \text{ i } W_r > 0 \\ 0, & \forall r \in R^{s,d} \text{ i } W_r = 0 \end{cases} \quad (2)$$

gde je  $|R^{s,d}|$  broj raspoloživih ruta između para čvorova ( $s,d$ ). Ruta  $r$  je raspoloživa ukoliko duž nje (na svim linkovima) postoji bar jedna ista slobodna talasna dužina.

Zatim, na osnovu vrednosti slučajno izabranog broja sa intervala  $[0,1]$  pčela odlučuje koju će rutu koristiti za dati par čvorova. Po izboru odgovarajuće raspoložive rute, vrši se dodela talasne dužine putu svetlosti primenom strategije slučajnog izbora rute (*random*). Nakon obilaska svih  $s$  fiktivnih čvorova u jednoj *etapi*, sve pčele se vraćaju nazad u košnicu i tamo razmenju informacije o kvalitetu do tada dostignutog parcijalnog rešenja (broju uspostavljenih puteva svetlosti).



Sl. 1 Ilustracija procesa *letenja pčela* kroz mrežu fiktivnih čvorova

3. Korak – odlučivanje pčela o nastavljaju ili odustajanju od postignutog parcijalnog rešenja. Na početku nove,  $u+1$  etape, pčela  $b$  će nastaviti da leti duž iste parcijalne rute kao i u prethodnoj etapi  $u$ , sa verovatnoćom:

$$p_b^{u+1} = e^{-\frac{C_{\max} - C_b}{u}} \quad (3)$$

gde je:

$C_{\max}$  – maksimalni broj do tada uspostavljenih puteva svetlosti među svim pčelama posmatrano kumulativno od početka procesa pretraživanja

$C_b$  – broj uspostavljenih puteva svetlosti za posmatranu  $b$ -tu pčelu,

$u$  redni broj etape.

Izvlačenjem slučajnog broja iz intervala  $[0,1]$  i poređenjem sa izračunatom vrednošću  $p_b^{u+1}$  donosi se odluka o tome da li pčela  $b$  nastavlja da koristi isto otkriveno parcijalno rešenje i u narednoj etapi ili od njega odustaje. U slučaju odustajanja, ona postaje neopredeljena pčela, i priključuje se nekim drugim pčelama.

4. Korak – pridruživanje drugim pčelama. Pčele koje odustaju od svog parcijalnog rešenja (neopredeljene pčele) pridružuju se drugim pčelama sa verovatnoćom  $p_P$

$$p_P = \frac{e^{C_P}}{\sum_{p=1}^P C_p} \quad (4)$$

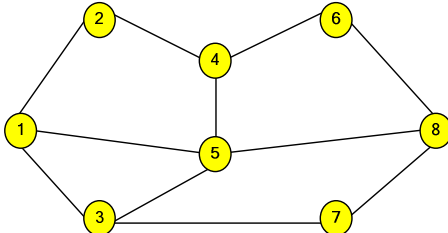
gde je:

$C_P$  – kvalitet  $P$ -te parcijalne rute koja se reklamira u košnici = broju ostvarenih konekcija duž  $P$ -tog parcijalnog puta koji se reklamira,

$p_P$  verovatnoća da će  $P$ -ti parcijalni put biti izabran od strane jedne neopredeljene pčele.

#### IV. NUMERIČKI EKSPERIMENT I REZULTATI SIMULACIJE

Opisani algoritam primenjen je za rešavanje statičkog problema rutiranja i dodele talasnih dužina u optičkoj WDM mreži u kojoj je dopuštena konverzija talasnih dužina u nekom od čvorova mreže. Analiziran je uticaj efekta primene konvertora talasnih dužina samo u jednom čvoru mreže na ukupan broj uspostavljenih puteva svetlosti u mreži, u odnosu na slučaj kada se konverzija ne primenjuje. Takođe, analiziran je i uticaj izbora lokacije čvora sa konvertorom talasnih dužina na ukupne ostvarene saobraćajne performanse u mreži.



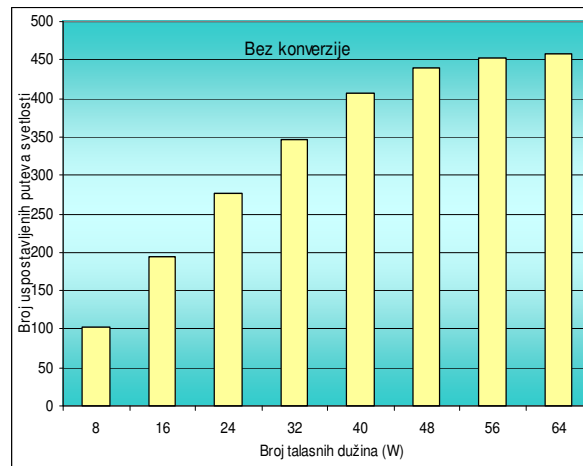
Sl. 2 Topologija posmatrane optičke WDM mreže

Za potrebe rešavanja *Max-RWA* problema razvijen je programski kod korišćenjem *MATLAB* softverskog paketa. Softver je testiran na primeru optičke WDM mreže, sa 8 čvorova i 11 linkova, čija je fizička topologija prikazana na slici 2. Pretpostavljeno je da na svakom fizičkom linku mreže, postoji po jedno nezavisno optičko vlakno za svaki smer prenosa, pri čemu je za maksimalan broj raspoloživih talasnih dužina pretpostavljeno da je isti na svim linkovima i da iznosi  $W$ .

Matrica saobraćajnih zahteva,  $D$ , definisana je kao slučajno generisana matrica broja zahtevanih puteva svetlosti između pojedinih parova čvorova. Primer jedne uniformno generisane saobraćajne matrice korišćene u procesu simulacije, uz ograničenje do najviše 15 zahtevanih puteva svetlosti između pojedinih parova čvorova, data je sledećim vrednostima:

	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
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

Ukupan broj zahtevanih puteva svetlosti u posmatranom matrici iznosi  $D_{tot}=457$ . Dobijeni rezultati za maksimalan broj uspostavljenih puteva svetlosti u mreži, za različite vrednosti talasnih dužina, u slučaju kada se ne primenjuje konverzija talasnih dužina ilustrovani su na slici 3. Prikazani rezultati predstavljaju maksimalne vrednosti dobijene tokom 10 nezavisno sprovedenih iteracija.



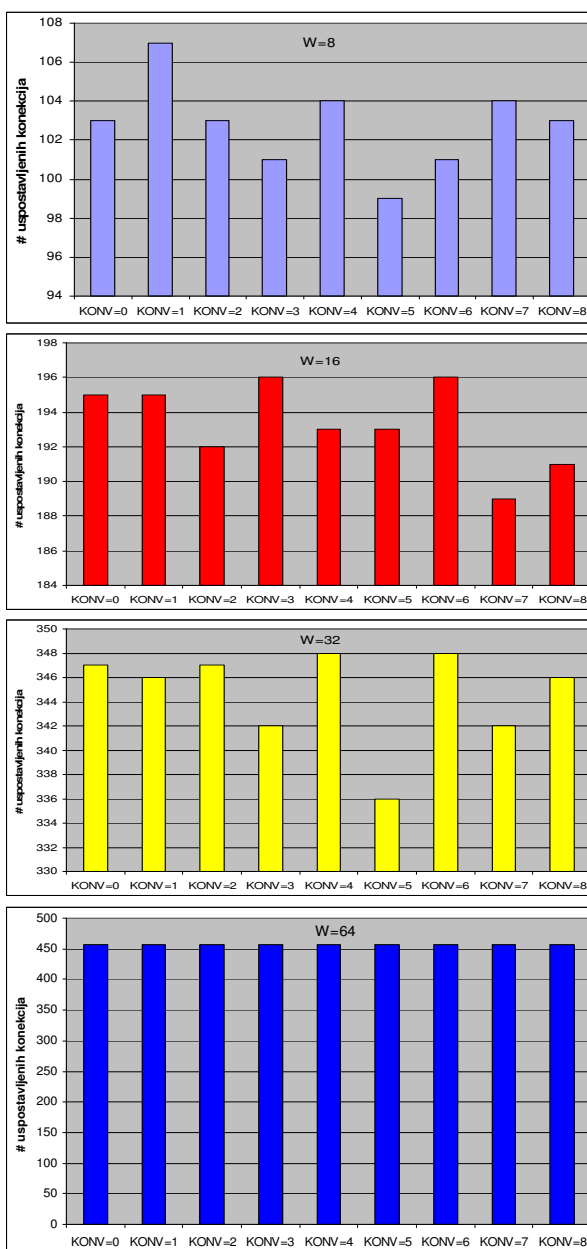
Sl. 3 Zavisnost broja uspostavljenih puteva svetlosti u funkciji broja talasnih dužina – slučaj bez konverzije

U Tabeli 1 prikazani su rezultati koji prikazuju broj uspostavljenih puteva svetlosti po pojedinačnim iteracijama algoritma, u slučaju primene konverzije talasnih dužina u čvoru broj 5. Potrebna CPU vremena za dobijanje rešenja problema (ukupno za svih 10 sprovedenih iteracija) variraju u granicam od nekoliko sekundi do nekoliko minuta u zavisnosti od broja talasnih dužina u mreži. Sprovedena testiranja su izvršena korišćenjem računarskog procesora na 1.73GHz sa 504MB RAM-a.

Tabela 1. Broj uspostavljenih puteva svetlosti po iteracijama – slučaj konverzije u čvoru 5

Broj talas. duž. (W)	Broj uspostavljenih puteva svetlosti po iteracijama (10 iteracija)	Max
8	99, 94, 95, 99, 92, 95, 93, 97, 96, 98	99
16	181, 187, 182, 169, 192, 176, 191, 177, 193, 185	193
24	254, 263, 268, 265, 264, 266, 267, 266, 258, 259	268
32	326, 331, 329, 336, 332, 330, 320, 330, 328, 336	336
40	383, 384, 386, 380, 386, 384, 395, 382, 391, 378	395
48	422, 426, 429, 427, 422, 424, 428, 428, 434, 432	434
56	446, 447, 456, 448, 450, 454, 450, 446, 451, 449	456
64	457, 457, 455, 457, 456, 456, 457, 456, 457, 457	457

Poređenjem rezultata iz Tab. 1 sa slučajem bez konverzije talasnih dužina može se uočiti da postavljanje konvertora talasnih dužina u posmatranom čvoru mreže, pri datom scenariju saobraćaja i fizičkoj topologiji mreže nebi doprinelo povećanju ukupnog broja uspostavljenih puteva svetlosti u mreži. Zbog toga je neophodno istražiti da li bi potencijalno lociranje konvertora u drugim čvorovima mreže moglo da doprinese povećanju ukupnog broja uspostavljenih puteva svetlosti. U tom cilju, izvršene su nezavisne simulacije i dobijena rešenja *RWA* problema, u slučajevima kada se konvertor talasnih dužina postavlja u različitim čvorovima posmatrane mreže. Dobijeni rezultati testiranja prikazani su na slici 4.



Sl. 4. Broj uspostavljenih puteva svetlosti u slučaju bez i sa konverzijom talasnih u pojedinim čvorovima mreže

Grafici prikazani na ovoj slici (za datu vrednost broja raspoloživih talasnih dužina W) ilustruju uporedo broj uspostavljenih puteva svetlosti u mreži, u slučaju kada se ne primenjuje konverzija talasnih dužina (što je na graficima simbolično označeno sa KONV=0), u odnosu na slučaj kada je konvertor talasnih dužina implementiran u pojedine čvorove mreže (KONV=1...8).

## V. ZAKLJUČAK

U radu je istraživana uticaj 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 ukupne saobraćajne performanse (broj uspostavljenih puteva svetlosti u mreži), osim od broja

raspoloživih talasnih dužina, što predstavlja dominantni faktor, zavise takođe i od lokacije čvorova u kojima su postavljeni konvertori talasnih dužina. Pokazuje se da konvertori talasnih dužina ne moraju uvek da doprinesu unapređenju performansi, što je pokazano primerom sa postavljanjem konvertora u čvoru 5 posmatrane mreže. 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 više čvorova mreže potencijalno bi dovelo do dodatnog unapređenja performansi, što će predstavljati predmet daljih istraživanja u okviru ovog problema.

## ZAHVALNICA

Ovaj rad je deo rezultata istraživanja na projektu »Optičke mreže naredne generacije – istraživanje mogućnosti unapređenja transportne mreže Srbije« koji je finansiran od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije (ev.br. TR11013)

## LITERATURA

- [1] C. 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. Netw. Mag.*, vol. 1, pp. 47–60, Jan. 2000.
- [3] R. Ramamurthy and B. Mukherjee, "Fixed-alternate routing and wavelength conversion in wavelength-routed optical networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 10, no. 3, pp. 351–367, Jun. 2002.
- [4] 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.
- [5] G. Marković, D. Teodorović, V. Aćimović, "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
- [6] G.Marković, *Optimizacija korišćenja resursa u optičkim mrežama sa rutiranjem po talasnim dužinama*, Doktorsta disertacija, Saobraćajni fakultet, Beograd 2007.
- [7] V.Aćimović-Raspopović, G. Marković »Rutiranje u optičkim mrežama sa talasnim multipleksiranjem« *Zbornik radova konferencije TELFOR 2003 CD izdanje*, nov. 2003; Beograd,

## ABSTRACT

This paper researches the routing and wavelength assignment (RWA) problem in wavelength routed optical networks. The bee colony optimisation (BCO) metaheuristic is applied to solve the RWA problem in a case of static traffic demands with the wavelength conversion applied in one network node. Simulation of the wavelength conversion procedure at different node locations is performed and the obtained results are compared.

## SOLVING THE RWA PROBLEM IN WDM NETWORKS USING THE BCO METAHEURISTIC

Goran Z. Marković, Vladanka S.Aćimović-Raspopović