

RUTIRANJE U OPTIČKIM MREŽAMA PRIMENOM ALGORITAMA INSPIRISANIH PONAŠANJEM MRAVA

Dušan Teodorović^{1,2}, Goran Marković¹

¹Saobraćajni fakultet u Beogradu

²Virginia Polytechnic Institute and State University

Sadržaj: *Od kolonija socijalnih insekata možemo da naučimo da veliki broj malih organizama koji međusobno komuniciraju može da formira sistem sposoban da izvršava veoma složene zadatke. Mravlji algoritmi predstavljaju jednu od najpoznatijih klasa algoritama inspirisanih ponašanjem mrava u prirodi. U ovom radu je ukazano na mogućnosti rešavanja složenih problema rutiranja u optičkim mrežama primenom mravljih algoritama.*

Ključne reči: *Rutiranje, Optičke mreže, Optimizacija kolonijom mrava*

1. Uvod

Multiagentni sistemi su okarakterisani postojanjem velikog broja agenata koji stupaju u različite međusobne interakcije na osnovu njima dostupnog *lokalnog* znanja. Posebnu vrstu agenata predstavljaju agenti kreirani na osnovu analogija sa kolonijama socijalnih insekata, jatima riba i jatima ptica. Za ponašanje socijalnih insekata (mravi, termi, pčele, ose) je karakteristična *autonomija, distribuirano funkcionisanje i samoorganizovanje*. Svakako da od kolonija socijalnih insekata možemo da naučimo da veliki broj malih organizama koji međusobno komuniciraju može da formira sistem sposoban da izvršava veoma složene zadatke. *Mravlji algoritmi* predstavljaju jednu od najpoznatijih klasa algoritama inspirisanih ponašanjem socijalnih insekata u prirodi. U ovom radu je ukazano na mogućnosti rešavanja složenih problema rutiranja u optičkim mrežama primenom mravljih algoritama. Rad je organizovan na sledeći način. U sekciji 2 izložene su osnovne postavke kolektivne inteligencije kolonije socijalnih insekata. U sekciji 3 su objašnjeni osnovni principi optimizacije kolonijom mrava. Fuzzy mravlji sistem je izložen u sekciji 4, dok su u sekciji 5 razmatrani problemi rutiranja i dodele talasnih dužina u optičkim mrežama primenom ACO algoritama.

2. Kolektivna inteligencija kolonije socijalnih insekata

Interakcija između pojedinih insekata u koloniji socijalnih insekata je veoma dobro istražena i opisana od strane biologa. Poznato je lučenje feromona (*pheromone*) od

strane mrava, ili igranje pčela tokom procesa prikupljanja hrane. Lučenjem feromona, igranjem, ili izvođenjem neke druge akcije, individue u koloniji šalju određene poruke ostalim članovima kolonije. Komunikacioni sistem formiran na ovaj način znatno doprinosi stvaranju *kolektivne inteligencije (Swarm Intelligence)* kolonije socijalnih insekata [1],[2],[3].

Samoorganizovanje mrava je zasnovano na relativno jednostavnim pravilima ponašanja individua [4]. Kod većine mravljih vrsta izvestan broj "skauta" napušta koloniju u potrazi za hranom [4]. Skauti koji su bili uspešni u pronalaženju hrane luče feromon i ostavljaju po zemlji trag feromona iza sebe. Feromon ukazuje ostalim mravima iz kolonije na put kojim treba da se kreću. Pojava sve većeg broja mrava na novootkrivenom putu znatno uvećava količinu depozitovanog feromona i samim tim pojačava signal koji se upućuje ostalim mravima koji tragaju za hranom. Pojačavanje feromonskog signala predstavlja tipično autokatalitičko ponašanje koje je karakteristično za procese koji se samopojačavaju i relativno brzo konvergiraju. U ovakvim procesima obično postoje mehanizmi koji sprečavaju "eksploziju" (na primer, depozitovani feromon vremenom isparava).

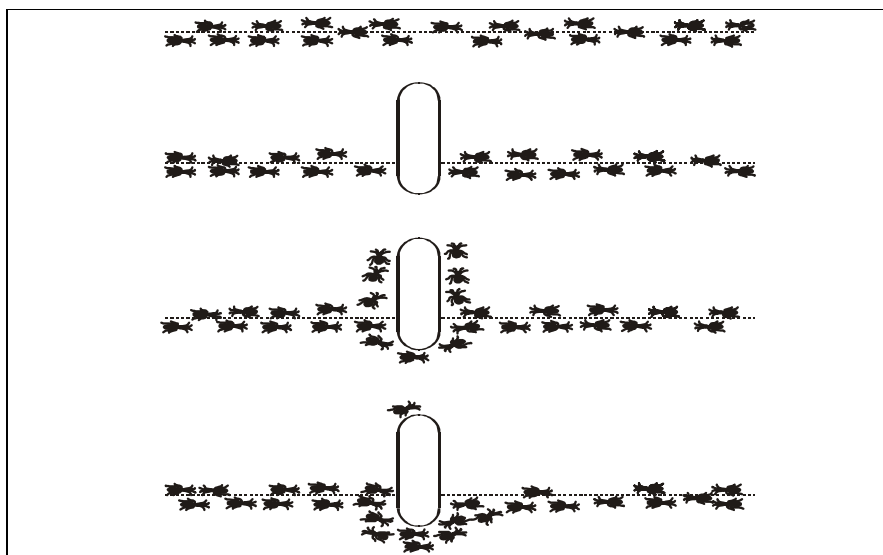
Prirodni sistemi treba da nam posluže kao izvor različitih ideja i modela od značaja za razvoj veštačkih sistema. Višeagentni sistemi predstavljaju sisteme sastavljene od napravljenih individua (robota, na primer), ili virtuelnih individua koje komuniciraju između sebe, saraduju, izmenjuju informacije i znanje i obavljaju određene zadatke u okruženju u kome "žive". Rezultati koje višeagentni sistem ostvaruje prilikom rešavanja složenih problema su jedini kriterijum koji treba koristiti prilikom evaluacije određenog višeagentnog sistema.

3. Optimizacija kolonijom mrava

Eksperimenti sa preprekom (Slika 1) pokazuju da mravi uspevaju veoma brzo da otkriju kraći put. Pretpostavlja se da je izboru svakog puta od strane mrava pridružena određena verovatnoća koja je utoliko veća ukoliko je jači feromon duž toga puta. Na početku ekpereimenta sa preprekom mravi se kreću duž najkraćeg puta između staništa i izvora hrane. Potom se mravima postavlja prepreka na njihovom putu što uslovljava da mravi moraju da skrenu levo ili desno. Otprilike polovina mrava skreće levo i otprilike polovina mrava skreće desno. Mravi koji su skrenuli desno stižu za kraće vreme da uzmu hranu i da se vrate u stanište, da ponovo odu po hranu, da se ponovo vrate, itd. Samim tim, količina feromona duž desnog puta i verovatnoća izbora ovog puta su sve veće i veće. Za relativno kratko vreme mravi su u stanju da otkriju kraći put.

Najznačajniji veštački sistemi razvijeni na inteligenciji roja su Mravlji sistem i Optimizacija kolonijom mrava [3],[5],[6],[7]. Optimizacija kolonijom mrava predstavlja novu heuristiku razvijenu sa ciljem da se pomoću nje rešavaju složeni problemi kombinatorne optimizacije.

Colorni i ostali [5] i Dorigo i ostali [6] su predložili Mravlji sistem i ilustrovali njegove osnovne koncepte prilikom rešavanja problema trgovačkog putnika. Prilikom rešavanja problema trgovačkog putnika veštački mravi pretražuju prostor dopustivih rešenja. Vršeći ovu pretragu veštački mravi imitiraju prave mrave koji u prirodi tragaju za hranom.



Slika 1. *Primer ponašanja mrava (a) mravi se kreću duž najkraćeg puta između staništa i izvora hrane, (b) mravima se postavlja prepreka na njihovom putu što uslovljava da mravi moraju da skrenu levo ili desno, (c) otprilike polovina mrava skreće levo i otprilike polovina mrava skreće desno, (d) mravi pronalaze novi najkraći put duž koga je izuzetno jak feromon.*

U “svetu” veštačkih mrava vreme je diskretno. Na početku rešavanja problema trgovačkog putnika (vreme $t = 0$), mravi se nalaze u različitim gradovima. Uobičajeno je da se sa $\tau_{ij}(t)$ označi intenzitet feromona na grani (i, j) u trenutku t . U početnom trenutku $t = 0$, vrednost $\tau_{ij}(0)$ je jednaka maloj pozitivnoj konstanti c . U trenutku t svaki mrav se kreće iz grada gde je lociran ka nekom drugom gradu. U nove gradove mravi stižu u trenutku $(t+1)$, itd. Mrav k koji je lociran u gradu i , će u trenutku t da krene ka gradu j sa verovatnoćom $p_{ij}^k(t)$ koja je definisana na sledeći način:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{h \in \Omega_i^k(t)} [\tau_{ih}(t)]^\alpha [\eta_{ih}]^\beta}, & \text{ako je } j \in \Omega_i^k(t) \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases} \quad (1)$$

gde je:

$\Omega_i^k(t)$ - skup dopustivih čvorova koje može da poseti mrav k (ovaj skup se bira za svakog mrava posle svakog novog pokreta mrava),

d_{ij} - Euklidsko rastojanje između čvora i i čvora j ,

$\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ - “vidljivost”,

α, β - parametri koji izražavaju relativni značaj intenziteta feromona i vidljivosti.

Vidljivost je zasnovana na lokalnim informacijama. Sa povećavanjem značaja koji se pridaje vidljivosti povećava se i verovatnoća izbora čvorova koji se nalaze u

neposrednoj blizini čvora u kome je lociran mrav. Na isti način se sa povećanjem značaja koji se pridaje količini feromona deponovanoj po pojedinim granama povećava i verovatnoća izbora grana duž koji je prošao veliki broj mrava.

Pod *pokretom* koji napravi jedan mrav podrazumeva se njegovo putovanje iz jednog u drugi cvor tokom posmatranog perioda vremena. Pod jednom *iteracijom*, Bonabeau i ostali [3] podrazumevaju n pokreta izvršenih od strane n mrava tokom vremenskog intervala $(t, t+1)$. Svaki mrav generiše rutu trgovačkog putnika posle n iteracija. Ciklus je sastavljen od m iteracija. Colorni i ostali [5], Dorigo i ostali [6] su predložili da se posle svakog izvršenog ciklusa količina feromona $\tau_{ij}(t)$ koja se nalazi na grani (i,j) ponovo proračuna na sledeći način:

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t) \quad (2)$$

gde je ρ koeficijent ($0 < \rho < 1$) takav da $(1 - \rho)$ predstavlja intenzitet isparavanja feromona tokom jednog ciklusa.

Ukupno povećanje količine feromona na grani (i, j) posle jednog završenog ciklusa je jednako:

$$\Delta \tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^n \Delta \tau_{ij}^k(t) \quad (3)$$

gde $\Delta \tau_{ij}^k(t)$ predstavlja količinu feromona koju je mrav k deponovao po grani (i, j) tokom ciklusa.

Količina feromona $\Delta \tau_{ij}^k(t)$ se izračunava na sledeći način:

$$\Delta \tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k(t)}, & \text{ako } k - \text{ti mrav pri svom kretanju tokom ciklusa koristi granu } (i, j), \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases} \quad (4)$$

gde je:

Q - konstanta,

$L_k(t)$ - dužina rute razvijene od k -tog mrava tokom ciklusa.

Kao što vidimo, u cilju otkrivanja dobrih rešenja, veštački mravi međusobno saraduju. Ova saradnja je iskazana kroz proces deponovanja feromona koji može takođe da bude interpretiran i kao proces tokom koga se razmenjuju informacije između mrava.

U cilju poboljšanja Mravljeg sistema Dorigo i Gambardella [7] su razvili *Optimizaciju kolonijom mrava (Ant Colony Optimization (ACO))* koja predstavlja novu heuristiku za rešavanje složenih problema kombinatorne optimizacije. Osnovna razlika između *Mravljeg sistema* i *Optimizacije kolonijom mrava* ogleda se u načinu na koji se izračunava verovatnoća da će mrav k koji je lociran u čvoru i da izabere čvor j . U slučaju Optimizacije kolonijom mrava ova verovatnoća se izračunava na sledeći način:

$$j = \begin{cases} \arg \max_{h \in \Omega_i^k(t)} \{ [\tau_{ih}(t)] [\eta_{ih}]^\beta \} & \text{ako je } q \leq q_0 \\ J, & \text{ako je } q > q_0 \end{cases} \quad (5)$$

gde je:

q - slučajni broj ravnomerno raspoređen na intervalu $[0,1]$,

q_0 - parametar ($0 \leq q_0 \leq 1$),

J - slučajan izbor zasnovan na relaciji (1); prilikom korišćenja relacije (1) pretpostavlja se da je $\alpha = 1$.

Na ovaj način se verovatnoća izbora sledećeg čvora umesto na slučajan-proporcionalan način (relacija (1)) računa na pseudoslučajan-proporcionalan način (relacija (5)).

U slučaju *Optimizacije kolonijom mrava* se nivo feromona na pojedinim granama menja na osnovu lokalnih pravila za promenu feromona i na osnovu globalnih pravila za promenu feromona. Lokalna pravila za promenu feromona nalaze da veštački mrav deponuje feromon duž svake grane koju poseti prilikom kreiranja rute trgovačkog putnika. Ovo pravilo glasi:

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \rho\tau_0 \quad (6)$$

gde je:

ρ – parametar ($0 < \rho < 1$),

τ_0 – količina feromona koju mrav deponuje na granu (i, j) tokom kreiranja rute trgovačkog putnika.

Pokazano je da se dobijaju dobri rezultati u slučaju kada je količina τ_0 jednaka početnom nivou feromona c .

Globalno pravilo za promenu se primenjuje tek kada svi mravi kreiraju rute trgovačkog putnika. Ovo pravilo glasi:

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \alpha)\tau_{ij}(t) + \alpha\Delta\tau_{ij}(t) \quad (7)$$

gde je:

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \begin{cases} (L_{gb}(t))^{-1}, & \text{ako } (i,j) \in \text{najboljoj od svih kreiranih ruta trgovačkog putnika} \\ & \text{otkrivenoj od pocetka procesa} \\ 0, & \text{u ostalim slučajevima} \end{cases} \quad (8)$$

$L_{gb}(t)$ – dužina najbolje rute trgovačkog putnika otkrivene od početka procesa,

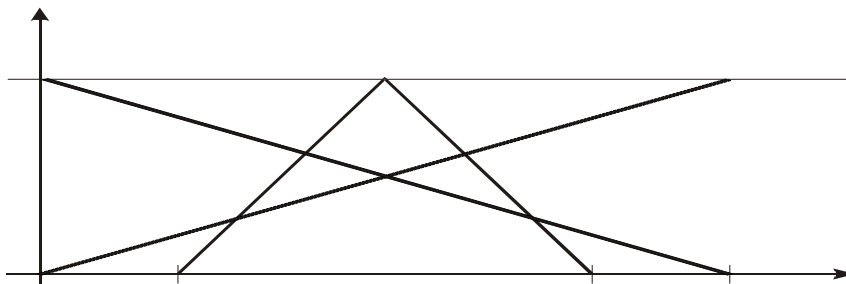
α – parametar koji reguliše isparavanje feromona ($0 < \alpha < 1$).

Na ovaj način primenom globalnog pravila za promenu feromona se nagrađuju “najbolji” mravi tako što se samo njihovim rutama dodeljuje dodatni feromon. Veći broj eksperimenata je pokazao da se primenom *Optimizacije kolonijom mrava* dobijaju bolji rezultati nego primenom “klasičnog” *Mravljeg sistema*.

4. Fuzzy mravlji sistem

Lučić i Teodorović [8], [9] su modifikovali *Optimizaciju kolonijom mrava* i predložili *Fazi mravlji sistem*. Ovi autori su kreirali *Fazi mravlji sistem* kombinujući *Optimizaciju kolonijom mrava* sa fazi logikom. Osnovnu modifikaciju predstavlja način izračunavanja verovatnoća odlaska mrava u sledeći čvor. Lučić i Teodorović [8] su svakom potencijalnom izboru novog čvora dodelili određene koristi koje ostvaruje mrav. Kao i u prethodnim slučajevima veštački mrav koji treba da donese odluku uzima u obzir vidljivost i količine feromona deponovane po pojedinim granama.

Fazi mravlji sistem je zasnovan na ideji da mrav doživljava određena rastojanja kao *kratka*, *srednja*, ili *duga*. Takođe, deponovanu količinu feromona mrav vidi kao *malu*, *srednju* ili *veliku*. Na slici 2 su prikazane funkcije pripadnosti fazi skupova kojima je moguće opisati lingvističke izraze *malo*, *srednje* i *dugo rastojanje*. Na sličan način moguće je prikazati i fuzzy skupove koji reprezentuju deponovanu količinu feromona.



Slika 2. Funkcije pripadnosti koje opisuju kratko srednje i dugo rastojanje

Pretpostavlja se da veštački mrav k koji se nalazi u čvoru i izračunava koristi (u_{ij}^k) koje može da očekuje ukoliko poseti čvor j . U zavisnosti od percipiranog rastojanja i percipirane količine deponovanog feromona mrav ostvaruje veće ili manje koristi ukoliko poseti određeni čvor. Mrav doživljava ove koristi kao *male, srednje, velike, ...* itd.

Algoritam aproksimativnog rezonovanja za izračunavanje koristi koje ima mrav pri izboru sledeće grane može, na primer, da bude sastavljen od pravila sledećeg tipa:

If rastojanje d_{ij} KRATKO i količina deponovanog feromona τ_{ij} VELIKA

Then koristi u_{ij} VRLO VELIKE

Algoritam aproksimativnog rezonovanja može da zameni izraze za izračunavanje verovatnoće izbora. Na ovaj način je moguće izračunavati koristi i u slučajevima kada su neke od ulaznih veličina poznate samo aproksimativno. Lokalna pravila za promenu feromona i globalna pravila za promenu feromona su u slučaju Fazi mravlje sistema ista kao i u slučaju Optimizacije kolonijom mrava.

5. Rešavanje problema rutiranja primenom ACO algoritama

ACO algoritmi su korišćeni i za rešavanje problema iz oblasti telekomunikacija, prvenstveno za rešavanje problema rutiranja u telekomunikacionim mrežama. Kao primeri primene mogu se navesti modeli analizirani u [10] koji razmatraju problem statičkog rutiranja telekomunikacionog saobraćaja u mrežama sa komutacijom kola, kao i problem dinamičkog rutiranja u mrežama sa paketskom komutacijom.

Skorija istraživanja pokazuju da se meta-heuristički ACO algoritmi mogu veoma uspešno primeniti i za rešavanje problema rutiranja i dodele talasnih dužina (*RWA-Routing and Wavelength Assignment*) u optičkim mrežama. *RWA* problem predstavlja problem kombinatorne optimizacije koji podrazumeva da se za svaki pojedinačni zahtev koji se generiše između parova čvorova u mreži odredi ruta i dodeli odgovarajuća talasna dužina. Za rešavanje ovog problema predloženi su brojni algoritmi, zasnovani na optimizacionim tehnikama ili heurističkim metodama. U [11,12] je dat detaljan pregled i opis razvijenih *RWA* modela. Međutim, do sada je objavljeno samo nekoliko radova, baziranih na ACO algoritmima, posvećenih rešavanju *RWA* problema u optičkim mrežama. U nastavku će biti razmatrane osnovne specifičnosti vezane za

Kratko rastojanje

primenu ACO algoritama u rešavanju problema rutiranja i dodele talasnih dužina u optičkim mrežama.

U [13] je razmatran *RWA* problem u optičkoj mreži sa konverzijom talasnih dužina u slučaju statičkih saobraćajnih zahteva. Razmatrani problem podrazumeva saobraćajnu situaciju u kojoj su svi zahtevi za uspostavljanjem puteva svetlosti između pojedinih parova čvorova unapred poznati. Talasne dužine se dodeljuju pojedinim putevima svetlosti tako da se njihov ukupan broj, potreban da bi se svi zahtevi uspešno zadovoljili minimizira. Put svetlosti je potpuno optički komunikacioni kanal koji se može uspostaviti korišćenjem nekoliko sukcesivnih grana od izvornog do odredišnog čvora u mreži, pri čemu u odsustvu konvertora talasnih dužina u međučvorovima, on mora biti uspostavljen korišćenjem iste talasne dužine na svim granama.

Da bi se postigao zahtevani cilj minimizacije potrebnog broja talasnih dužina u mreži potrebno je puteve svetlosti rutirati tako da se obezbedi njihovo ravnomerno raspoređivanje po pojedinim granama u mreži, uz istovremeno težnju da se biraju što je moguće kraće rute. Rutiranje po dugim putanjama bi potencijalno moglo da prouzrokuje povećanje potrebnog broja talasnih dužina, s obzirom da se na svakoj grani duž puta mora zauzeti po jedna raspoloživa talasna dužina. S druge strane, rutiranje „po najkraćem putu“ nije uvek najbolje rešenje, jer bi moglo da dovede do povećanja potrebnog broja talasnih dužina na granama koje ulaze u sastav najkraćih puteva. Usled toga, rutiranje po neznatno dužim, a manje opterećenim putevima bi moglo da obezbedi manji ukupan broj upotrebljenih talasnih dužina na granama mreže. Da bi se ovo postiglo, u [13] je predložen koncept za izbor grane koji integriše dva faktora: *faktor atraktivnosti* i *faktor odbijanja*. Mravu je određena grana utoliko atraktivnija ukoliko je količina njegovog sopstvenog feromona na posmatranoj grani veća. S druge strane, određena grana je mravu utoliko odbojnija i manje privlačna ukoliko je veća količina feromona deponovana na toj grani od strane drugih mrava.

Označimo sa α_{kj} težinski faktor atraktivnosti k -te grane u slučaju kada izbor grane vrši j -ti mrav. Težinski faktor α_{kj} se definiše na sledeći način:

$$\alpha_{kj} = \frac{P_{kj}}{\sum_{i \in A_j} P_{ij}}, \quad (9)$$

gde je A_j skup svih grana dostupnih mravu, p_{kj} količina sopstvenog feromona na posmatranoj grani, a $\sum_{i \in A_j} p_{ij}$ ukupna količina feromona koju je j -ti mrav deponovao po ostalim granama koje razmatra kao potencijalne kandidate.

Označimo sa β_{kj} težinski faktor odbojnosti k -te grane u slučaju kada izbor grane vrši j -ti mrav. Težinski faktor β_{kj} se definiše na sledeći način:

$$\beta_{kj} = \frac{P_{kj}}{\sum_{i \in A_j} P_{ij}}, \quad (10)$$

gde je A_j skup svih grana dostupnih mravu, P_{kj} ukupna količina na k -toj grani deponovana od strane ostalih mrava ($P_{kj} = \sum_{h \neq j} P_{kh}$), a $\sum_{i \in A_j} P_{ij}$ ukupna količina feromona

deponovana od strane ostalih mrava po ostalim granama koje razmatra kao potencijalne kandidate.

Predloženo je [13] da se verovatnoća, γ_{kj} , izbora k -te grane od strane j -tog mrava izračunava kao:

$$\gamma_{kj} = \frac{\alpha_{kj} / \beta_{kj}^\varepsilon}{\sum_{i \in A_j} (\alpha_{ij} / \beta_{i,j}^\varepsilon)}, \quad (11)$$

gde je ε konstanta. Kao što vidimo, verovatnoća izbora grane se povećava sa porastom težinskog faktora atraktivnosti. Istovremeno, ova verovatnoća opada sa rastom težinskog faktora odbojnosti grane.

Tokom svakog ciklusa algoritma, mravi se kreću od izvornog do odredišnog para čvorova, prelazeći po jednu granu u svakom vremenskom koraku algoritma. Mravi ažuriraju svoj feromon ili u svakom koraku algoritma (lokalno) ili u svakom ciklusu (globalno). Predloženi ACO algoritam razvijen je u tri varijante, u zavisnosti od toga kako se vrši ažuriranje feromona. Na osnovu sprovedenih eksperimenata na tri različite topologije optičke mreže, od kojih jedna predstavlja deo evropske optičke mreže sa 9 čvorova, utvrđena je varijanta ažuriranja feromona koja daje najbolje rezultate u pogledu potrebnog broja talasnih dužina.

U [14] je rešavan *RWA* problem u optičkim mrežama u situaciji dinamičkih saobraćajnih zahteva primenom ACO algoritama. Dinamički saobraćajni scenario podrazumeva slučajne trenutke pojavljivanja zahteva između pojedinih parova čvorova u mreži, kao i njihovo slučajno vremensko trajanje. U ovakvoj situaciji rutiranje i dodela talasne dužine se moraju izvršiti u trenutku kada se svaki zahtev pojavi. Cilj je da se sa raspoloživim (ograničenim) brojem talasnih dužina uspostavi što je moguće veći broj zahtevanih puteva svetlosti, odnosno minimizira verovatnoća blokiranja. Primenjeni ACO algoritam zasniva se na sličnom konceptu opisanom u [13], modifikovanom za slučaj dinamičkih saobraćajnih zahteva. ACO algoritam testira hipotezu da li potencijalno korišćenje neznatno dužih putanja, sa manjim stepenom zauzetih talasnih dužina može da omogući smanjenje verovatnoće blokiranja u mreži. Algoritam se zasniva na sledećem principu: Kada se zahtev za uspostavljanjem puta svetlosti u mreži pojavi, određeni broj mrava se šalje iz izvornog čvora sa ciljem da pronađu putanje do odredišnog čvora. Kada mravi stignu do odredišta, sve putanje kojima su se oni kretali se beleže. Putanje se uređuju na osnovu informacija o njihovoj dužini i zauzetosti grana. Nakon što svi mravi stignu u odredišni čvor, bira se najbolja putanja za uspostavljanje konekcije. Jedna od raspoloživih talasnih dužina na putanji se zatim bira, prema nekom od uobičajenih pravila, kao što je najmanje indeksirana, najčešće korišćena ili slučajno izabrana talasna dužina. Primenjeni algoritam testiran je na ARPA-2 topologiji optičke mreže sa 21 čvorem, 26 grana i 16 talasnih dužina po svakoj grani, za različite ulazne parametre algoritma, kao što su primenjeni metod izbora talasne dužine, broj generisanih mrava, normalizovana vrednost parametra koji reprezentuje odnos dužine putanje i broja slobodnih talasnih dužina [14]. Rezultati eksperimenata pokazuju da primena predloženog ACO algoritma, u poređenju sa drugim heurističkim RWA algoritmima, predloženim u [15], može da obezbedi bolje rezultate u pogledu verovatnoće blokiranja zahteva. Osnovni nedostatak algoritma je što unosi značajno kašnjenje, jer zahteva da svi mravi pristignu u odredišni čvor, pre nego što se donese konačna odluka o izboru

putanje. Osim toga, mravi generisani iz jednog čvora nemaju nikakvu saradnju sa mravima generisanim iz ostalih čvorova.

U ACO algoritmu predloženom u [16], svi mravi kooperativno vrše procenu trenutnog stanja mreže i omogućavaju kontinualno ažuriranje tabela rutiranja u svakom čvoru mreže. Na ovaj način se za zahtevani put svetlosti veoma brzo određuje ruta u trenutku nailaska zahteva, uz istovremeno garantovanje male verovatnoće blokiranja zahteva. U ovom algoritmu se kretanje mrava kroz mrežu odvija u nezavisnoj kontrolnoj ravni, koja se realizuje na principu paketske komutacije, u mreži čija je topologija ista kao i topologija posmatrane optičke mreže. Svaki mrav se posmatra kao paket koji se sastoji od kraćeg niza bita (koji odgovara broju talasnih dužina na grani), tako da je vremensko kašnjenje usled procesiranja paketa neznatno. Binarna vrednost 1 nosi podatak o tome da je talasna dužina na posmatranoj grani slobodna, a binarna 0 podatak da je odgovarajuća talasna dužina zauzeta. Ažuriranje ove povorke bita vrši se u svakom usputnom čvoru na putanji duž koje se posmatrani mrav kreće. Za simulaciju ove mreže korišćen je ns-2 *Network Simulator*. Simulacija ACO algoritma je sprovedena na sledeće tri topologije optičke mreže: *SimpleNet* (6 čvorova, 8 grana), *NSFNet* (14 čvorova, 21 grana) i *ARPA-2* (21 čvor, 26 grana). Izvršeno je poređenje rezultata sa dostupnim rezultatima za algoritme fiksnog i fiksnog alternativnog rutiranja. Na osnovu rezultata simulacija prikazanih u [16], pokazuje se da predloženi ACO algoritam daje manje ili značajno manje verovatnoće blokiranja u odnosu na strategije fiksnog i fiksnog alternativnog rutiranja.

6. Zaključna razmatranja

U radu su izložene osnovne postavke ACO algoritama. Takođe su prikazani dosadašnji rezultati primene ACO algoritama za rešavanje problema rutiranja u optičkim mrežama. Prikazani primeri primene pokazuju da se ACO heuristički algoritmi mogu veoma uspešno primeniti za rešavanje statičkih i dinamičkih *RWA* problema u optičkim mrežama.

Literatura

- [1] Beni, G., The concept of Cellular Robotic System, In *Proceedings 1988 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, 57-62, Los Alamitos, CA, IEEE Computer Society Press, (1988).
- [2] Beni, G. & Wang, J., Swarm Intelligence, In *Proceedings Seventh Annual Meeting of the Robotics Society of Japan*, Tokyo, RSJ Press, (1989), 425-428.
- [3] Bonabeau, E., Dorigo, M. & Theraulaz, G., *Swarm Intelligence*, Oxford University Press, Oxford, (1999).
- [4] Deneubourg, J.L., Goss, S., Franks, N. & Pasteels, J.M., The Blind Leading the Blind: Modeling Chemically Mediated Army Ant Raid Patterns, *Journal of Insect Behavior*, 2, (1989), 719-725.
- [5] Coloni, A., Dorigo, M. & Maniezzo, V., Distributed Optimization by Ant Colonies, In *Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*, Varela, F., and Bourgine, P., (eds.), Paris, France, Elsevier, (1991), 134-142.

- [6] Dorigo, M., Maniezzo, V., Colomi, A., "Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B*, 26, (1996), 29-41.
- [7] Dorigo, M. & Gambardella, L.M., "Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Travelling Salesman Problem", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1, 53-66, (1997).
- [8] P. Lučić, D. Teodorović, "Transportation Modeling: An Artificial Life Approach", *Proceedings of the 14th IEEE "International Conference on Tools with Artificial Intelligence"*, pp. 216-223, November 4-6, 2002 Washington D.C.
- [9] D. Teodorović, P. Lučić, "Schedule Synchronization in Public Transit by Fuzzy Ant System", *Transportation Planning and Technology*, vol. 28, 2005, pp. 47-77.
- [10] K.M. Sim and W.H. Sun, "Ant Colony Optimization for Routing and Load-Balancing: Survey and New Directions," *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics. Part A*, Vol. 33 No. 5 pp. 560-572. Sept. 2003.
- [11] Hui, Z., Jue, J., and Mukherjee, B. "A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks," *Optical Networks*, January 2000.
- [12] V. Acimović-Raspopović, G. Marković »*Routing in Optical WDM Networks*«, Invited paper, Proc. of TELFOR Conference, Belgrade 2004, available at www.telfor.org
- [13] Navarro-Varela, G. and Sinclair, M. "Ant-Colony Optimisation for Virtual-Wavelength-Path Routing and Wavelength Allocation," Proc. Congress on Evolutionary Computation (CEC'99), Washington DC, USA, July 1999, pp. 1809-1816.
- [14] R.M. Garlick and R.S. Barr, "Dynamic Wavelength Routing in WDM Networks via Ant Colony Optimization," in *Ant Algorithms*. Springer-Verlag Publishing, pp. 250-255, Sept. 2002
- [15] Mokhtar, A. and Azizoglu, M. "Adaptive Wavelength Routing in All-Optical Networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 6, No. 2, April 1998.
- [16] Son-Hong Ngo, X. Jiang and S. Horiguchi "Adaptive Routing and Wavelength Assignment Using Ant-Based Algorithm", *IEEE International Conference on Networks, ICON 2004*, 16-19 Nov. 2004, Hilton Singapore
- [17] K. M. Sim and W. H. Sun, "Multiple ant-colony optimization for network routing," in *Proc. 1st Int. Symp. Cyberworld*, Tokyo, Japan, November 2002, pp. 277-281.

Abstract: *Social insects colonies teach us that a great number of simple organisms that communicate and collaborate create systems capable to solve various complex problems. Ant algorithms represent one of the best known classes of the algorithms inspired by nature. The possibilities of using Ant algorithms when solving routing problems in optical networks have been considered in this paper.*

Keywords: *Routing, Optical Networks, Ant Colony Optimization*

ROUTING IN OPTICAL NETWORKS BY ANT COLONY OPTIMIZATION

Dušan Teodorović, Goran Marković