

RAZVOJ ALGORITAMA ZA RUTIRANJE BAZIRANIH NA HOPFIELD-OVOJ NEURALNOJ MREŽI

Nenad Kojić¹, Irini Reljin², Branimir Reljin³

¹Visoka škola strukovnih studija za informacione i komunikacione tehnologije
²Elektrotehnički fakultet, ³Inovacioni centar Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu

Sadržaj: Algoritmi za rutiranje imaju sve važniju ulogu u savremenim komunikacionim mrežama. Ovo je posledica potrebe za racionalnim korišćenjem ograničenih resursa mreže koji se dodatno zauzimaju povećanjem broja korisnika ali i sve zahtevnijim korisničkim aplikacijama. Dodatni problem unosi vrlo dinamičan i "eksplozivan" saobraćaj koji je posledica prenosa multimedijalnih sadržaja u realnom vremenu. U takvim okolnostima dinamički algoritmi za rutiranje, koji svoje odluke donose na bazi stvarnog stanja u mrežama, sve više dolaze do izražaja. Njihova kompleksnost u nekim situacijama može biti ograničavajući faktor, pa postoji stalni trend da se ovi algoritmi dodatno usavrše. Jedan od načina je i primena veštačke inteligencije u procesu donošenja odluka. U ovom radu prikazaće se razvoj algoritama za pronalaženje putanje koji su bazirani na radu Hopfield-ove neuralne mreže. Pored toga, prikazaće se moguća primena ove vrste rekurentnih mreža na dinamičko multicast rutiranje u mrežama sa paketskim saobraćajem.

Ključne reči: algoritmi za rutiranje, dinamičko rutiranje, Hopfield-ova neuralna mreža

1. Uvod

Dvadeseti vek je obeležen intenzivnim razvojem i primenom informacionih i komunikacionih tehnologija, u najširim slojevima društva [1]. Ovo je za posledicu imalo masovnu proizvodnju računara i računarske opreme. U takvim okolnostima se nameće i intenzivan razvoj računarskih mreža [1]. Realizacijom fizičkih topologija za umrežavanje korisnika, nameće se potreba za razvojem logičkih načina (algoritama) za uspostavljanje konekcija [2]. Tehnološkom evaluacijom komutacije kola u komutaciju paketa, i uvođenjem sve sofisticiranih uređaja (rutera, svičeva itd.) za rutiranje paketskog saobraćaja, ovi algoritmi postaju protokoli za rutiranje. Primarna uloga protokola za rutiranje je uspostavljanje najbolje putanje za prenos poruka između dva ili više mrežnih elemenata [2]. Ova komunikacija može biti između kranjih uređaja ali i između dve računarske mreže. U tom smislu postoji veliki broj podela protokola za rutiranje i načina njihove implementacije [2]. Cilj algoritama za rutiranje nije samo ispravan prenos

podataka između dva korisnika, nego i maksimalna racionalizacija mrežnih resursa. Ovo je posebno bitno u savremenim uslovima rada, kada se broj usluga i korisničkih servisa višestruko povećava i kada servisi zahtevaju sve više mrežnih resursa [1], a posebno kod multimedijalnih servisa i prenosa multimedijalnih sadržaja u realnom vremenu. Permanentnom edukacijom krajnjih korisnika, njihova očekivanja postaju sve veća, pa se i garancija kvaliteta servisa sve češće podrazumeva u najširem spektru ponuđenih usluga [1]. Da bi se ovo postiglo, kapacitet transportne mreže, mreža za pristup i kvalitet konekcije krajnjeg korisnika treba da se permanentno uvećavaju. Na žalost, realne mogućnosti nisu uvek srazmerne zahtevima korisnika, pa se jedan deo ovih problema rešava sve sofisticiranijim algoritmima za rutiranje. Na taj način se različitim logikama pokušava što bolje iskoristićenje postojećih resursa mreže i što optimalniji prenos [2]. Ovo je posebno bitno u uslovima sve "eksplozivnijeg" saobraćaja koji se zatheva i generiše u mreži, i koji je često teško predvidljiv [2].

U skladu sa svim navedenim razlozima, potreba za algoritmima za rutiranje postaje sve veća, zbog čega se ova oblast permanentno usavršava i istražuje. U tim cilju, jedna grupa naučnih radova bazirana je na primeni veštačke inteligencije [3]. Ova naučna disciplina se intenzivno razvija od polovine prošlog veka. Danas imamo relativno veliki dijapazon različitih načina za primenu tehnologija koje su bazirane na simulacija rada biološkog nervnog sistema [3]. Jedna od alata je Hopfield-ova neuralna mreža (HNM), koja pripada grupi veštačkih neuralnih mreža [3]. Ove mreže su inspirisane radom biološkog mozga čoveka i potencijalnom simulacijom bioloških procesa koji se dešavaju u njemu, sa ciljem pronalaženja što kvalitetnije i optimalne logike rada kao i kranjeg rešenja posmatranog problema. Ova mreža je dobila ime po J. J. Hopfield-u, koji je mehanizam rada ove mreže predstavio u svom radu 1982. godine [4]. Od tog trenutka, ova mreža se intenzivno razvija i modifikuje za rešavanje širokog spektra optimizacionih problema, od strane velikog broja istraživača [6-35].

Ovaj rad ima za cilj da prikaže osnovne principe rada ove mreže, njenu primenu na rešavanja problema pronalaženja najkraće putanje i njenu dalju evoluciju kroz algoritme za rutiranje. U skladu sa sve zastupljnijim zahtevima za distribuciju sadržaja sa jedne lokacije na više destinacija, prikazaće se jedno rešenje za dinamičko *multicast* rutiranje bazirano na radu Hopfield-ove neuralne mreže.

Ovaj rad je organizovan u pet poglavlja. Nakon Uvoda, objašnjeni sui osnovni principi rada HNM za potrebe pronalaženja najkraće putanje. Modifikacije EF, u cilju dodatnog usavršavanja ponuđenog Hopfield-Tank modela ali i primena na rešavanje problema rutiranja paketskog saobraćaja prikazano je u trećem poglavlju. U četvrom poglavlju prikazano je jedno rešenje autora za potrebe dinamičkog *multicast* rutiranja. Zaključak i dalje smernice rada dati su u petom poglavlju.

2. Hopfield-ova neuralna mreža

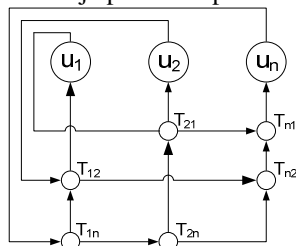
Hopfield predlaže da jedan sloj HNM vrši procesiranje signala i na kraju vrši njegovu binarnu klasifikaciju [4]. Konačne vrednosti na izlazu neuralne mreže su 0 ili 1, u zavisnosti da li je vrednost signala bila manja ili veća od definisanog praga θ . Matematički posmatrano, izlaz i -tog neurona v_i u izlaznom sloju [3, 4] je 1, ako je $\sum_j T_{ij} u_j \geq 0$, tj. 0 u suprotnom, gde je T_{ij} težinski koeficijent za vezu između neurona i i

j , u_j je stanje j -tog neurona a θ_i je definisani prag za i -ti neuron. Ovako definisane vrednosti neurona na njegovom izlazu nazivaju se stanja neurona. Arhitektura mreže na slici 1, predstavlja matematičku reprezentaciju povezanosti ove mreže. Jedna od dobrih karakteristika HNM, je što se može realizovati i u hardverskom obliku, i na taj način naći primene u realnom okruženju. Ukoliko se svaki od neurona predstavi električnom šemom na slici 2, i ukoliko se pored sopstvene pobude, neuroni dodatno pobuđuju i spoljašnjim signalom (*Bias* struja I), dobija se električna šema za realizaciju HNM, slika 3. Izlaz nelinearnog pojačavača, sa slike 2, ograničen je vrednošću $[0,1]$, čime se zadovoljava početna pretpostavka za ograničenjem izlaznog signala u tom intervalu.

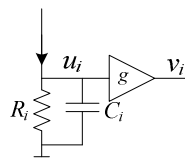
Uslov koji treba da zadovolji funkcija prenosa nelinearnog pojačavača je da je diferencijabilna na celom intervalu i monotonno rastuća [4]. Ovo znači da ako je $u > u'$ tada je $g(u) > g(u')$. Tako definisana funkcija g naziva se aktivaciona funkcija. Jedna od mogućih aktivacionih funkcija je i sigmoidalna data sa

$$v = g(u) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha u}} \quad (1)$$

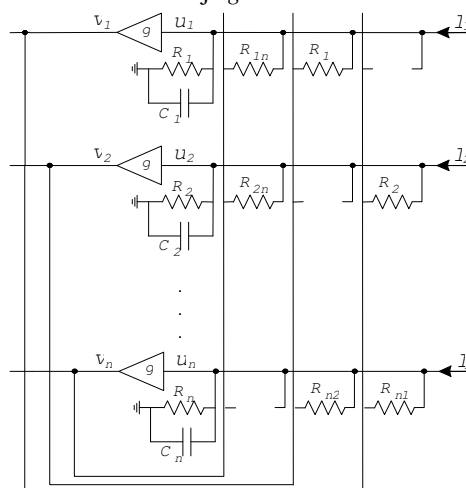
pri čemu je pozitivan parametar α nagib aktivacione funkcije g .



Slika 1. Osnovna arhitektura Hopfield-ove neuralne mreže.



Slika 2. Električna šema modela neurona u Hopfield-ovoj neuralnoj mreži.



Slika 3. Električna šema realizacije Hopfield-ove neuralne mreže.

U Hopfield-ovoj realizaciji definisani su uslovi $T_{ij} = T_{ji}$, i $T_{ii} = 0$ koji uz uslov $a_i > 100$, zadovoljavaju opšti uslov Liapunov-e stabilnosti [3], čime se omogućava definisanje energijske funkcije (EF) koja opisuje stanje mreže definisana sa [5]:

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N T_{ij} v_j v_i - \sum_{i=1}^N I_i v_i \quad (2)$$

Hopfield je pokazao da promena energije ∂E , kada nema promene signala, $du_i/dt = 0$, mora biti manja ili jednaka nuli, da bi sistem bio stabilan. Uz ovaj uslov, sistem je stabilan, pa se može očekivati da se dobrim odabirom elemenata EF i strukturom HNM, može dobiti alat za rešavanje pojedinih vrsta optimizacionih problema.

Primena Hopfield-ove neuralne mreže na rešenje problema trgovačkog putnika

Za potrebe rešenja problema Trgovačkog putnika (TP), Hopfield i Tank [5] predložili su energijsku funkciju oblika

$$E = \frac{A}{2} \sum_X \sum_i \sum_{j \neq i} v_{xi} v_{xj} + \frac{B}{2} \sum_i \sum_X \sum_{X \neq Y} v_{xi} v_{yi} + \frac{C}{2} \left(\sum_X \sum_i v_{xi} - n \right)^2 + \frac{D}{2} \sum_X \sum_{Y \neq X} \sum_i d_{XY} v_{xi} (v_{Y,i+1} + v_{Y,i-1}) \quad (3)$$

Prva tri člana u (3), gde su koeficijenti A , B i C relativno velike pozitivne vrednosti, obezbeđuju validnu putanju trgovačkog putnika dok poslednji termin treba da obezbedi najkraću putanju. Indeksi matrica su u formi modula n , da bi se ukazalo da je n -ti grad u putanji povezan i sa prvim i $n-1$ gradom, tj: $v_{Y,n+j} = v_{Yj}$. Sve oznake imaju dva indeksa u formi X_i , gde je prva oznaka vrste (koja odgovara gradu) a druga kolona (koja odgovara poziciji grada u konačnoj putanji) posmatrane matrice.

Za ovaj problem, Hopfield i Tank predlažu matricu konduktansi u formi

$$T_{xi,yj} = -A \delta_{XY} (1 - \delta_{ij}) - B \delta_{ij} (1 - \delta_{XY}) - C - D d_{XY} (\delta_{j,i+1} + \delta_{j,i-1}) \quad (4)$$

gde je $\delta_{ii} = 1$, $\delta_{ij} = 0$, za $i \neq j$. dok je bias struja $I_{xi} = Cn$.

U radu [6], Hopfield i Tank su pokazali da predloženi model daje vrlo dobra rešenja za potrebe optimizacije putanje trgovačkog putnika a da pri tome ima relativno malu složenost algoritma, posebno kada broj gradova raste. Efikasnost svog modela Hopfield je demonstrirao na složenom problemu trgovačkog putnika sa 30 gradova [5].

3. Modifikacije Hopfield-Tank modela

Nakon Hopfield-ova dva rada [4] koja su se više bavila teorijskim postavkama i definisanjem modela ove veštačke neuralne mreže (VNM), rad Hopfield-Tank iz [5] predstavlja konkretnu implementaciju predložene mreže. Obzirom na kvalitet dobijenih rezultata, ova mreža postaje vrlo popularna za druge istraživače i to kod vrlo širokog spektra primena [6-39]. Najveći broj radova usmeren je na modifikaciju predložene EF za različite optimizacione probleme. Jedan od prvih značajnijih radova je rad autora Rauch-Winarske iz 1988. godine. U radu [6] autori predlažu VNM dimanzija $n \times m$ gde vrednost m , koja je manja od n , ukazuje na broj čvorova u konačnoj putanji. Iako ovo rešenje nudi prve modifikacije Hopfield-Tank modela, a veliki nedostatak ovog rešenja je neophodnost prethodnog poznavanja broja čvorova u najkraćoj putanji. U radu [7] autori predlažu dizajn VNM za traženje najkraće putanje između dve tačke. Ovo rešenje daje relativno dobre rezultate, ali problem predstavlja potreba za promenom konfiguracije VNM svaki put kada se promeni kombinacija izvorišta i odredišta. Dodatni problem je što je u njihovom predlogu matrica *Rastojanje*, u EF, ima kvadratni eksponent, što direktno utiče ne matricu sinaptičkih konduktansi. Na ovaj način Zhang-Thomopoulos omogućavaju da se problem traženja najkraće putanje između dve tačke realizuje primenom HNM, što predstavlja konkurentsku logiku poznatom Dijkstra algoritmu. Iste, 1989 godine, Wieselthier i grupa autora objavljuju rad u kome se prvi put HNM koristi kod rešavanja problema rutiranja u paketskim (radio) mrežama. Šta više oni problem rutiranja posmatraju sa aspekta interakcije sa zagušenjem paketa u mreži i algoritmima za rutiranje, čime se na direktan način pokazuje mogućnost HNM za primene u radio mrežama. Ubrzo zatim, 1991. godine Brown, u svojoj doktorskoj disertaciji detaljnije analizira rad HNM i daje jedno rešenje za upravljanje slanjem paketa u mreži [8]. Iste

godine, Wieselthier modifikuje svoj rad iz 1989. i nudi rešenje za primenu ove mreže kod rutiranja u *multihop* radio mrežama [9].

Godine 1993. Ali-Kamoun predlažu primenu ove mreže na parametre koji ne moraju biti samo fizička rastojanja između gradova [10] i uvode niz značajnih poboljšanja u HNM. Ali-Kamoun predlažu i drugačiji oblik energijske funkcije definisan kao

$$E = \frac{\mu_1}{2} \sum_X \sum_{i \neq X} C_{Xi} v_{Xi} + \frac{\mu_2}{2} \sum_X \sum_{i \neq X} \rho_{Xi} v_{Xi} + \frac{\mu_3}{2} \sum_X \left(\sum_{i \neq X} v_{Xi} - \sum_{i \neq X} v_{iX} \right)^2 + \frac{\mu_4}{2} \sum_i \sum_{X \neq i} v_{Xi} (1 - v_{Xi}) + \frac{\mu_5}{2} (1 - v_{ds}) \quad (5)$$

Matrica C , sa vrednostima C_{Xi} definiše cene linkova između dva čvora grafa tj. rutera (X i i). Pored ovoga, značajna novina u predlogu Ali-Kamouna je i uvođenje matrice povezanosti ρ , kojom se opisuje topologija mreže. Predloženo rešenje Ali-Kamouna se pokazalo kao vrlo pogodno za realne implementacije, a naročito sa aspekta realne obrade signala. Iz tog razloga, ovo rešenje će se koristiti kao polazna osnova za sve dalje modifikacije sa ciljem rešavanja transportnih optimizacionih problema. Godine 1995. objavljen je rad [11] u kome prikazuju primenu moguću primenu modifikacije EF za *multicast* rutiranje u realnim mrežama. Ovaj rad predstavlja prekretnicu kod primena HNM u *multicast* rutiranju, koje već tada dobija na značaju. Autori su pokazali da se mogu postići "dobra" rešenja ako se njihov model analizira sa aspekta matrica *Rastojanje* ali i kombinacije sa matricom *Kašnjenje*. Predloženo rešenje kašnjenje paketa u mreži posmatra kao restriktivni faktor u definisanju dostupnih linkova, pa se svodi na rad sa jednim parametrom po kome se vrši optimizacija putanje. Iste godine, predstavljeno je jedno rešenje HNM podjednako dobro za električne i optičke mreže, ali i njihovo potencijano povezivanje (*optical interconnection network*) [12]. Iste godine, u S.G. Hong je pokazano da je moguće koristiti HNM i za mreže koje se vektorski predstavljaju. Oni su definisali neophodne promene u energijskoj funkciji kojima se može postići dobijanje putanja sa minimalnom cenom i u ovoj vrsti reprezentacije komunikacione mreže. Iste 1995. godine autori rada [13] ukazuju na moguću primenu HNM u telekomunikacionim mrežama, u problemima rutiranja. 1996. godine u radu [14], dinamika stanja i -og neurona, u trenutku $t+1$, ne mora uvek direktno zavisiti samo od stanja ovog neurona u trenutku t . Pokazano je da se predloženim modifikacijama ova zavisnost može posmatrati na drugi način a tako postići izuzetno visok procenat konvergencije mreže ka željenom stanju, pa da je broj validnih putanja (u pojedinim slučajevima) blizak 100%. Iste godine, Van den Berg prikazuje mogućnost kreiranja generičkog okruženja (*The most general framework*) za inicijalnu vrstu HNM (CHNN - *Continuous Hopfield neural networks*). Ovo okruženje treba da ponudi model za generalizaciju energijske funkcije HNM, u slučaju korišćenja CHNN. Autori rada [15] su 1998. godine ponudili rešenje kojim se originalni model HNM može dodatno usavršiti u smislu izbegavanja konvergencije ka lokalnim minimumima kod rešavanja kombinatorno-optimizacionih problema. Problem pronalaženja lokalnih minimuma, umesto globalnog, je jedan od ključnih problema u radu HNM, pa ovaj rad ima značajan doprinos u rešavanju ovog problema.

Jedan od vrlo citiranih radova je rad autora Park i Choi [16], koji je objavljen 1998. godine i nudi rešenje za primenu HNM kod rutiranja sa više destinacija uz povećanje performansi konvergencije uzimajući u obzir i topologiju mreže, što inicijalno započinju autori Ali i Kamoun. U radu [17] autori predlažu rešenje kojim se povećava brzina konvergencije mreže ka krajnjem rešenju. Ova promena definisana je modifikacijom EF. Iste godine objavljen je rad [18] u kome standardnu jednoslojnu

mrežu realizuju kao dvoslojnu, i na taj način povećavaju konvergenstnost rada mreže u rešavanju definisanog problema. Ove promene su takođe realizovane modifikacijom EF. Iste godine, autori rada [19] prikazuju jedno moguće rešenje za rutiranje paketa koje je bazirano na minimalnom kašnjenju u mreži. Predloženo rešenje u značajnoj meri modifikuje originalnu EF i realizuje se u dve faze rutiranja. Ovaj rad se može smatrati jednim od bitnih modifikacija HNM jer uvodi mogućnost primene i drugih realnih parametara u komunikacionim mrežama, osim cene tj. rastojanja. Ubrzo zatim, 2002. godine autori rada [20] objavljuju rad u kome pokazuju širok dijapazon primena HNM u realnim telekomunikacionim mrežama. Njihovo rešenje pokazuje da je moguće analizirati ne samo rastojanje i kašnjenje, nego uzeti u obzir i kapacitet linkova i baferovane pakete u čvorovima, a sve u cilju pronalaženja najkraće putanje sa minimizacijom ukupnog srednjeg kašnjenja duž te putanje. Već 2003. Kumar i Venkataram predlažu nadogradnju algoritma [20] za *multicast* rutiranje u mobilnim mrežama. Obzirom na ekspanzivni razvoj mobilne telefonije i pokrivenost mobilne mreže, kao i broj korisnika i servisa u njoj, ovaj rad je značajan obzirom da pokazuje mogućnosti HNM i u ovoj specifičnoj vrsti mreža. Iste, 2003. godine, autori u [21] pokazuju moguću primenu kod multi-agent rutiranja. Iako je ovaj rad baziran na statičkoj telekomunikacionoj mreži, on je pokazao da se HNM može koristiti i u ovom domenu primene za potrebe rutiranja.

Sve većom zastupljenošću multimedijalnih servisa u bežičnim mrežama, pojavljivao se sve veći broj autora koji su svoj doprinos pokušavali da daju baš u ovoj oblasti. Jedni od prvih, rad iz 2004. godine [22], predlažu rešenje koje je bazirano na HNM sa cilje obezbeđivanja kontrole i garancije kvaliteta servisa u multimedijalnim bežičnim mrežama. U radu [23], autori 2006. godine objavljuju rezultate primene HNM za potrebe rutiranja paketskog saobraćaja na bazi istovremene analize većeg broja realnih mrežnih parametara. Pored parametara koji su do sada korišćeni kod drugih autora, sada se u analizu uzima i analiza trenutne gustine saobraćaja na linkovima. Ovi autori pokazuju još jednu moguću implementaciju za potrebe faze rutiranja u potpuno optičkim mrežama, koja je bazirana na trenutno raspoloživom kapacitet linkova [24]. Tokom 2007. godine, Lagoudakis je u svom radu [25] predstavio jedno rešenje za dinamičko rutiranje i dinamičko planiranje buduće trase uz uslov maksimalnog izbegavanja zagušenja. U radu [26] autori pokazuju da je moguće realizovati unapređeni algoritam u smislu brzine i pouzdanosti, ukoliko se parametri koje koristi HNM pravilno izaberu. Za potrebe pronalaženja ovih parametara autori koriste i druge optimizacione tehnike. Iste godine, objavljeni su rezultati implementacije HNM za potrebe dinamičkog *multicast* rutiranja, baziranog na pet različitih parametara [27]. Pored cene, topologije, kapaciteta i gustine saobraćaja, analizirano je i kašnjenje na linkovima.

Primenu HNM u potpuno optičkim mrežama, za potrebe objedinjenog procesa rutiranja i dodele talasnih dužina, autori [28] objavljuju 2009. godine. Predloženi algoritam predviđa dinamičko rešenje za proizvoljnu topologiju mreže sa ciljem pronalaženja putanje uz istovremenu analizu mrežnih parametara i raspoloživih talasnih dužina po linkovima. Na bazi ranijih rezultata za primenu HNM kod *multicast* rutiranja, 2010. autori rada [29] predstavljaju svoj algoritam koji ima za cilje pronalaženje optimalne *multicast* putanje na bazi ukupnog kašnjenja na putanji. Obzirom na aktuelnost *multicast* rutiranja, iste godine Idrees objavljuje rad [30] u kome predlaže algoritam za rutiranje kome je kvalitet servisa primarni faktor. Na ovaj način se pokazuje da se algoritmi za rutiranje, čak i u uslovima *multicast* rutiranja, mogu kontrolisati sa ciljem

obezbeđenja kvaliteta servisa upotrebom logike HNM. Pri tome, pomenuto rešenje uzima u obzir cenu, kapacitet i kašnjenje što ukazuje na mogućnost višeparametarskog rutiranja. Iste godine, u radu [31] objavljuju jedno rešenje za potrebe dinamičkog rutiranja u mobilnim ad-hoc mrežama. Autori rada [32], iste godine predstavljaju još jedan rad u kome se HNM mreža koristi sa tehnologijom mobilnog agenta u cilju unapređivanja pojedinih performansi algoritama za rutiranje.

2012. godine, u radu [33] predstavljen je algoritam za poboljšanje postupka rutiranja koji je baziran na uvođenju dinamičke klasterizacije i koji koristi dve vrste neuralnim mreža. U rezultatima rada [34] sublimirana su rešenja Ali i Kamouna i neka od poboljšanih rešenja drugih autora, i primenjena na deo rezultata iz rada [22, 26] uz uvođenje još jednog parametara po kome se vrši dinamičko *multicast* odlučivanje. Na taj način primenjeno je rešenje za pronalaženje putanje, bazirano na HNM, koje uzima u obzir topologiju mreže, cene linkova, kapacitete, gustine saobraćaja na njima, kašnjenja i statističke pokazatelje koji su rezultat analize zastupljenosti pojedinih linkova u konačnim putanjama.

Svi navedeni primeri, koji predstavljaju samo manji deo ukupno publikovanih radova, nedvosmisleno pokazuju da se HNM može kvalitetno upotrebiti u različitim procesima za potrebe poboljšanja algoritama za rutiranje.

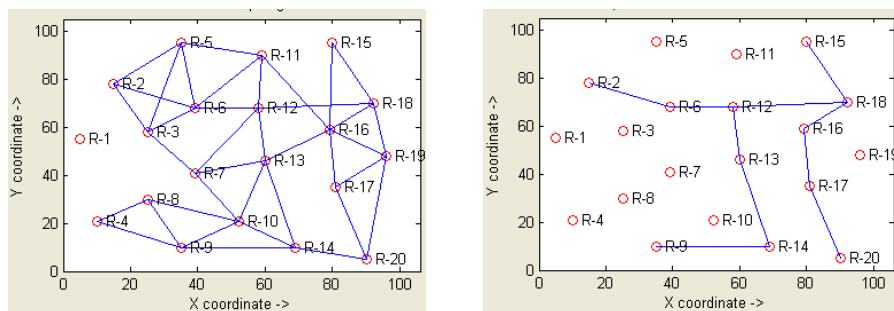
4. Jedno rešenje dinamičkog multicast rutiranja baziranog na Hopfield-ovoj mreži

U skladu sa opisanim kretanjima u razvoju i primeni Hopfield-ove neuralne mreže, prikazaće se jedno rešenje za dinamičko multicast rutiranje.

$$E^m = \frac{\mu_1}{2} \sum_x \sum_{i \neq x} C_{xi} \cdot v_{xi}^m f_{xi}^m(v) + \frac{\mu_2}{2} \sum_x \sum_{i \neq x} \rho_{xi} \cdot v_{xi}^m + \frac{\mu_3}{2} \sum_x \left(\sum_{i \neq x} v_{xi}^m - \sum_{i \neq x} v_{ix}^m \right)^2 + \frac{\mu_7}{2} \sum_x \sum_{i \neq x} \tau_{xi} \cdot v_{xi}^m f_{xi}^m(v) + \frac{\mu_4}{2} \sum_i \sum_{x \neq i} v_{xi}^m (1 - v_{xi}^m) + \frac{\mu_5}{2} (1 - v_{ms}^m) + \frac{\mu_6}{2} \sum_x \sum_{i \neq x} (1 - M_{xi}) \cdot v_{xi}^m f_{xi}^m(v) + \frac{\mu_8}{2} \sum_x \sum_{i \neq x} (1 - S_{xi}) \cdot v_{xi}^m f_{xi}^m(v) \quad (6)$$

Polazeći od EF definisane u [5], kao i modifikacije definisane u [10], i uzevši u obzir način definisanja *multicast* putanja opisan u [11], kreirana je namenska EF koja analizira sve parametre opisane u [23] dobijena je relacija (6). U relaciji 6, matrica **C** predstavlja matricu cena, matrica **ρ** matricu povezanosti, matrica **M** razliku kapaciteta linka i trenutne zauzetosti istog, **τ** matricu kašnjenja na linkovima i **S** matricu statističkih pokazatelja zastupljenosti linka u ranijim putanjama.

Za ovako definisanu EF kreiran je Matlab kod, koji ima svoj GUI za unos konstanti i prikaz dobijenih podataka. Ulazne matrice definisane su kao random generisane u intervalu [0-1]. Za topologiju mreže korišćena je topologija objavljena u radu [16]. Za izvorišni čvor izabran je čvor 2, dok su za *multicast* prenos destinacijski izabrani 9, 15 i 20. Na slici 4.a. prikazana je redukovana topologija korišćene mreže. Ova redukcija je posledica uvedenih restrikcija (npr. Kapacitet linka je već maksimalno iskorišćen, kašnjenje na linku je veće od dozvoljenog, itd.). Nakon pokretanja algoritma, dobijeno je konzistentno stablo za rutiranje, koje povezuje izvorišni sa tri odredišna čvora.



Slika 4. a) Redukovana topologija mreže na bazi mrežnih parametara i b) dobijena multicast putanja u skladu sa parametrima iz relacije (6).

Ova putanja dobijena je na bazi cene linkova, kapacitet i trenutne gustine saobraćaja na njima, kašnjenja na linkovima i statističkih pokazatelja. Prikazani algoritam je vrlo osjetljiv na promene u mreži, što se manifestuje promenom putanja svaki put kada se promenom parametara pojavi neka druga putanja koja je niže ukupne cene od postojeće.

5. Zaključak

U radu je predstavljena evolucija Hopfield-ove neuralne mreže sa akcentom na primenu u algoritmima za rutiranje. Veliki broj istraživača pokazao je da ova neuralna mreža može da ponudi vrlo kvalitetna rešenja u različitim fazama postupka rutiranja i u različitim mrežnim okruženjima. U radu su prikazani i konkretni rezultati implementacije ove mreže na problem dinamičkog *multicast* rutiranja. Dalja istraživanja biće usmerena ka mogućim hardverskim realizacijama predloženog rešenja.

Literatura

- [1] H. F. Ulrich, E. P. Lehrmann, I. Abe, P. S. Andre, D. J. Atkin, *Telecommunications Research Trends*, Nova Science Pub Inc, 2008.
- [2] D. Medhi, K. Ramasamy, *Network Routing: Algorithms, Protocols, and Architectures*, Elsevier 2007.
- [3] S. Haykin, *Neural networks- a comprehensive foundation*, MacMillan collage Publishing Company, Inc., 1994.
- [4] J. J. Hopfield, "Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities," *Proc. Nat. Acad. Sci.*, Vol. 79, pp. 2554–2558, 1982.
- [5] J. J. Hopfield, D. W. Tank, "Neural' computations of decision in optimization problems", *Biol. Cybern.*, No. 52, pp. 141–152, 1985.
- [6] H. Rauch, T. Winarske, "Neural networks for routing communication traffic", *IEEE Cont. Syst. Mag.*, pp. 26-30, April 1988.
- [7] L. Zhang, S. Thomopoulos, "Neural network implementation of the shortest path algorithm for traffic routing in communication networks", *Proc. Int. Joint Conf. Neural Networks*, June 1989.

- [8] T. X. Brown, "Neural network design for switching network control", Caltech Ph. D. Thesis, 1991.
- [9] J. E. Wieselthier, C. M. Barnhart, A. Ephremides, "A Neural Network Approach to Routing in Multihop Radio Networks", in *Proc. of 1991 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, pp. 1074-1083, 1991.
- [10] M. Ali, F. Kamoun, "Neural networks for shortest path computation and routing in computer networks", *IEEE Trans. on Neural Networks*, No. 6(4), pp. 941-953, 1993.
- [11] C. Pornavalai, G. Chakraborty, N. Shiratori, "A neural network approach to multicast routing in real-time communication networks", *Third International Conference on Network Protocols (ICNP'95)*, pp. 332-339, 1995.
- [12] C.L. Giles, M.W. Goudreau, "Routing in Optical Multistage Interconnection Networks: a Neural Network Solution", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 13, No. 6, pp. 1111-1115, 1995.
- [13] B. Reljin, I. Reljin, "Rešavanje problema rutiranja pomoću neuralnih mreža", *Zbornik 13. simpozijuma o novim tehnologijama u PTT-u*, Saobraćajni fakultet, Beograd, Dec. 1995.
- [14] J. Mandziuk, "Solving the travelling salesman problem with a hopfield—type neural network", *Demonstratio Mathematica*, Vol. 29, No. 1, pp. 219-231, 1996.
- [15] K. Smith, M. Palaniswami, M. Krishnamoorthy, "Neural Techniques for Combinatorial Optimization with Applications", *IEEE Transactions on neural networks*, Vol. 9, No. 6, pp. 1301-1318, Nov. 1998.
- [16] D.C. Park, S.E. Choi, "A neural network based multi-destination routing algorithm for communication network", *Proc. Jnt. Conf. Neural Networks*, Anchorage, USA, pp. 1673-1678, 1998.
- [17] C.W. Ahn, R.S. Ramakrishna, C.G. Kang, I.C. Choi, "Shortest path routing algorithm using Hopfield neural network", *Electronics Letters*, Vol. 37, No. 19, 2001.
- [18] F. Araujo, B. Ribeiro, L. Rodrigues, "A neural network for shortest path computation", *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 12, No. 5, pp.1067-73, 2001.
- [19] G. Feng, C. Douligeris, "A Neural Network Method for Minimum Delay Routing in Packet-Switched Networks", *Computer Communications*, Vol. 24, No. 10, pp. 933-941, 2001.
- [20] P. Venkataram, S. Ghosal, B. P. V. Kumar, "Neural network based optimal routing algorithm for communication networks", *Intl. Jl. of Neural Networks*, Vol. 15, No. 10, pp. 1289-1298, 2002.
- [21] A.V. Syrtzev, A.V. Timofeev, "Neural Approach in Multi-Agent Routing for Static Telecommunication Networks", *Int. Journal "Information Theories and Their Applications"*, Vol.10, No. 2, pp. 167-172, 2003.
- [22] C. W. Ahn, R. S. Ramakrishna, QoS Provisioning Dynamic Connection-Admission Control for Multimedia Wireless Networks Using a Hopfield Neural Network, *IEEE Transactions on vehicular technology*, Vol. 53, No. 1, January 2004.
- [23] N. Kojic, I. Reljin, B. Reljin, "Neural network for optimization of routing in communication networks", *FACTA UNIVERSITATIS*, Series: Electronics and Energetics, 2006. No. 2(19), pp. 317-329.
- [24] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Routing in optical networks by using neural network", *Proc. of 8th Sem.NEUREL*, pp. 65-68, Beograd, Sept. 25-27, 2006.

- [25] M. G. Lagoudakis, "Hopfield Neural Network for Dynamic Path Planning and Obstacle Avoidance", *Technical Paper*, University of Southwestern Louisiana, 2007.
- [26] C. J. A. Bastos Filho, W. H. Schuler, A. L. I. Oliveira, "A fast and reliable routing algorithm based on Hopfield Neural Networks optimized by Particle Swarm Optimization", in *Proc. Int. Joint Conf. on Neural Networks*, pp: 2777-2783, 2008.
- [27] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Dinamičko multicast rutiranje primenom Hopfield-ove neuralne mreže", *Telekomunikacije*, Broj 1, pp. 76-85, 2008.
- [28] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "All-Optical Network with Simultaneous in-node Routing and Wavelength Assignment", *TELFOR Journal*, Vol.1, No.1, pp. 18-21, '09.
- [29] S. Jain, J. D. Sharma, "Delay Bound Multicast Routing Using Hopfield Neural Network", *Int. Journal of Computer Theory and Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp.1793-8201, 2010.
- [30] A. K. Idrees, "Neural network for QoS multicast routing in computer networks", *Journal of Babylon University*, Vol. 18, No. 3, 2010.
- [31] N. Kojić, M. Zajeganović, I. Reljin, B. Reljin, "New algorithm for packet routing in mobile ad-hoc networks", *Journal of Automatic Control*, Vol 20, pp. 9-16, 2010.
- [32] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Jedno rešenje problema rutiranja mobilnim agentom primenom Hopfield-ove neuralne mreže", *ETRAN*, Donji Milanovac, Jun 7-10, 2010.
- [33] N. Kojic, I. Reljin, B. Reljin, "Hybrid routing protocol for wireless mesh network based on neural network", *Journal Sensors, Sensors Networks*, 12(6), pp. 7548-7575, 2012.
- [34] N. Kojic, I. Reljin, B. Reljin, "Neural Network Based Dynamic Multicast Routing", *Journal of Electron. and Electrical Engineering*, (accepted paper No. 3(129), 2013.).

Abstract: *Routing algorithms play an increasingly important role in the modern communication networks. This comes as a consequence of the need for rational use of limited resources of network that are increasingly occupied by an additional increase in the number of users, as well as more demanding user applications. An additional problem is brought by existence of very dynamic and "explosive" traffic which is the result of multimedia content in real time. In such circumstances, dynamic routing algorithms, which make their decisions based on the actual situation in the networks, are increasingly coming to the fore. In some situations, their complexity can be a limiting factor, so there is a steady trend for further improvement of these algorithms. One way is the use of artificial intelligence in the decision making process. In this paper, the development of algorithms for finding the routing path that is based on the work of Hopfield's neural network is presented. In addition, the possible applications of this type of recurrent networks to the dynamic multicast routing in networks with packet traffic will be shown.*

Keywords: *routing algorithms, dynamic routing, Hopfield neural network.*

DEVELOPMENT OF THE ROUTING ALGORITHMS BASED ON HOPFIELD NEURAL NETWORK

Nenad Kojić, Irini Reljin, Branimir Reljin