

## PROŠIRENJE FUNKCIONALNOSTI NS-3 SIMULATORA ZA RUTIRANJE U AD HOC BEŽIČNIM MREŽAMA

Marija Malnar, Nenad Jevtić  
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet  
m.malnar@sf.bg.ac.rs, n.jevtic@sf.bg.ac.rs

**Sadržaj:** *Bežične ad hoc mreže - WANETs (Wireless Ad hoc Networks) jedne su od najčešće korišćenih mreža u svakodnevnom životu. Poslednjih decenija razvijaju se različiti protokoli i metrike rutiranja za WANET mreže sa ciljem da obezbede korisnicima visoke protoke i mala kašnjenja. Korišćenje računarskih simulacija česta je praksa za testiranje performansi predloženih protokola u različitim mrežnim scenarijumima, kao i za evaluaciju njihovog značaja i upotrebne vrednosti. Jedan od najnovijih, ali često korišćenih simulatora diskretnih događaja je NS-3 (Network Simulator 3) koji je razvijen u svrhe istraživačkog rada i edukacije. U ovom radu razmatraju se mogućnosti proširenja koda za često korišćeni AODV (Ad-hoc on demand distance vector) protokol u cilju implementacije link-quality metrika pomoću kojih se poboljšavaju performanse WANET mreže.*

**Ključne reči:** *wireless ad hoc mreže, NS-3 simulator, link-quality metrike, AODV protokol*

### 1. Uvod

Bežične ad hoc mreže – *Wireless ad hoc networks* (WANETs) primenjuju se u različitim aplikacijama, od javnih mreža do mreža za bezbednost i upravljanje u slučaju kriza [1], [2]. Postoji više vrsta WANET mreža: bežične *mesh* mreže – *Wireless Mesh Networks* (WMNs), mobilne ad hoc mreže – *Mobile Ad hoc Networks* (MANETs), ad hoc mreže za vozila – *Vehicle Ad hoc Networks* (VANETs), itd. WMN uglavnom čine statični čvorovi koji su povezani u *mesh* topologiju. I MANET i VANET mreže čine mobilni čvorovi. U MANET mrežama čvorovi se slobodno i slučajno kreću u bilo kom pravcu, dok se u VANET mrežama čvorovi (vozila) kreću u organizovanom maniru, u skladu sa putevima, semaforima, saobraćajnim znacima i sl.

Imajući u vidu sve navedeno, može se reći da WANET mreže imaju dinamičnu topologiju, promenljiv kapacitet linka (propusni opseg, džiter, verovatnoću greške i sl.), promenljivu potrošnju energije i ograničenu sigurnost. Iz tih razloga, upravljanje kreiranjem topologije, konfiguracija i održavanje WANET mreža veoma su važni. Protokoli rutiranja i metrike rutiranja odgovorne su za održavanje mrežne topologije i određivanje putanja u mreži [3]. Veliki broj protokola i metrika rutiranja za WANET mreže predlažu se kako bi se poboljšale i optimizovale mrežne performanse. Svi protokoli i metrike daju različite rezultate po pitanju protoka, latentnosti, verovatnoće

gubitka paketa, kašnjenja sa kraja na kraj, mrežnog dobitka i sl. Jedna od najčešće korišćenih metrika za sve vrste WANET mreža je *Expected Transmission Count* (ETX) metrika koja je predložena od strane De Couto [4].

Kako je eksperimentalna evaluacija protokola i metrika rutiranja veoma skupa i zahteva puno vremena, veliki broj istraživanja u poslednje vreme koristi neki od mrežnih simulatora kao alternativu kojom se vrši abstrakcija detalja implementacije, s jedne strane, dok se, sa druge strane, zadržava realna slika mreže u velikoj meri. Postoji mnogo simulatora diskretnih događaja koji su javno dostupni. Neki od najčešće korišćenih su Omnet++ [5], Glomosim [6], Network Simulator 2 (NS-2) [7], Network Simulator 3 (NS-3) [8], itd.

Jedan od prvih saveta kada je u pitanju izbor simulatora je da se izbegavaju simulatori koji su pisani na osnovu dva programska jezika (*dual language simulator*) kako bi se smanjila kompleksnost. Imajući u vidu da su Omnet ++, Glomosim i NS-2 napisani u dva programska jezika, a da je, s druge strane NS-3 simulator zasnovan samo na C++ programskom jeziku, nije iznenađenje da istraživači bežičnih mreža sve više pažnje posvećuju upravo NS-3 simulatoru. Dodatna prednost NS-3 simulatora je podrška *scheduler-a* u realnom vremenu. Korisnici mogu da šalju i primaju pakete generisane u NS-3 simulatoru na uređaje u realnoj mreži.

NS-3 simulator najviše se koristi u istraživačke svrhe. Iako u okviru samog simulatora postoje implementirani mnogi protokoli i algoritmi, ne postoji implementacija najčešće korišćene ETX metrike. ETX metrika može se koristiti u različitim protokolima rutiranja. Osnovni cilj ovog rada je da opiše detaljnu implementaciju ETX metrike u okviru poznatog *Ad-hoc on demand distance vector* (AODV) [9] protokola u NS-3 simulator.

Rad je strukturiran na sledeći način. U drugom poglavlju dat je kratak opis ETX metrike i AODV protokola. U trećem poglavlju opisana je implementacija ETX metrike u okviru AODV protokola, nazvana ETX-AODV. U okviru četvrtog poglavlja objašnjena je evaluacija predložene implementacije u NS-3 simulatoru. Zaključna razmatranja i smernice za dalji rad date su u poslednjem poglavlju.

## 2. ETX metrika u okviru AODV protokola

U ovom poglavlju uvedena je ETX metrika. Kao što je ranije rečeno, ona se može koristiti u različitim protokolima rutiranja. U ovom radu izabran je AODV protokol jer je on jedan od najčešće korišćenih protokola.

### 2.1. ETX metrika

ETX [4] metrika nekog linka predstavlja procenjen broj potrebnih transmisija kako bi se paket uspešno poslao preko nekog linka, sa uključenim retransmisijama. Za paket za koji nije uspešno primljen paket potvrde (*acknowledgment*) vrši se retransmisija.

Ako se sa  $p_f$  označi verovatnoća uspešnog slanja paketa, a sa  $p_r$  verovatnoća da je paket potvrde - ACK uspešno primljen, verovatnoća uspešnog prenosa biće  $p_f p_r$ .

Tada je ETX metrika za link  $l$ , definisana kao:

$$ETX_l = \frac{1}{p_f \cdot p_r} \quad (1)$$

Verovatnoće  $p_f$  i  $p_r$  određuju se merenjem broja difuznih probnih paketa – *Link Probe Packets* (LPPs) [4]. Svaki čvor difuzno emituje LPP pakete fiksne veličine, na svakih  $\tau$  sekundi. Da bi se izbegle potencijalne sinhronizacije slanja LPP paketa koje bi uzrokovale kolizije u mreži, uvodi se džiter za od do  $\pm 0.1\tau$  za svaki LPP. Imajući u vidu da su LPP paketi difuzni paketi, čvorovi ne odgovaraju na njih potvrdama niti ih reemituju u slučaju neuspešnog prenosa.

Svaki čvor pamti broj LPP paketa koje je primio u poslednjih  $w$  sekundi, i na osnovu tog broja određuje verovatnoću  $p_r$  u bilo kom vremenskom trenutku  $t$  kao:

$$p_r = \frac{\text{count}(t-w, t)}{w/\tau} \quad (2)$$

$\text{Count}(t-w, t)$  predstavlja broj LPP paketa koji su primljeni tokom vremenskog prozora  $w$ , a  $w/\tau$  predstavlja broj LPP paketa koje je čvor u toku istog vremenskog prozora trebalo da primi.

U slučaju linka od čvora X ka čvoru Y (link  $X \rightarrow Y$ ), ovom tehnikom se omogućava čvoru X da meri  $p_r$ , a čvoru Y da meri  $p_f$ . Imajući u vidu da čvor Y zna da treba da primi LPP paket od čvora X svakih  $\tau$  sekundi, Y može tačno da izračuna trenutni gubitak paketa od X čak i ako ne primi nijedan LPP paket od njega [4]. Za određivanje veličine prozora  $w$  korišćene su empirijske metode u radu [4]. Eksperimenti su pokazali da je optimalna vrednost za prozor  $w=10\tau$ . Najčešće se za  $\tau$  uzima vrednost od jedne sekunde.

Izračunavanje ETX metrike za neki link zahteva poznavanje obe verovatnoće, i  $p_f$  i  $p_r$ . Iz tog razloga, svaki LPP paket poslat od čvora X sadrži informaciju o broju LPP paketa koje je X primio od svojih susednih čvorova u poslednjih  $w$  sekundi. Na ovaj način omogućeno je svim susedima čvora X, ujedno i čvoru Y, da izračuna verovatnoću  $p_f$  ka čvoru X svaki put kada od čvora X primi LPP paket [4].

Metrika putanje  $r$ , predstavlja sumu ETX metrika za svaki link  $l$  na putanji  $r$  [4]:

$$ETX_r = \sum_{l \in r} ETX_l \quad (3)$$

## 2.2. AODV protokol

AODV [9] je reaktivni protokol rutiranja, što znači da se putanja određuje na zahtev, odnosno samo kada čvor ima neki paket podataka koji želi da pošalje. AODV koristi tri osnovna kontrolna paketa *Route Request* (RREQ), *Route Replay* (RREP) i *Route Error* (REER).

Kada izvorišni čvor, S, želi da pošalje paket podataka ka određi čvoru, D, on prvo šalje RREQ paket, sa dužinom putanje jednakom nuli (polje *hop count* setovano je na 0) i difuzno emituje RREQ u mrežu. RREQ paket može primiti ili neki međučvor, M, ili odredišni čvor, D.

Ukoliko RREQ paket primi međučvor, M, on kreira (ili ažurira) svoj podatak u tabeli rutiranja (*routing table entry*) putanjom do izvorišnog čvora, S. Vrednost *hop count* do izvorišnog čvora predstavlja primljenu vrednost iz RREQ paketa uvećanu za jedan.

Međučvor proverava u primljenom RREQ paketu da li je D fleg (*Destination only flag*) postavljen na 1. Ukoliko jeste, čvor M ažurira primljeni RREQ paket uvećanjem *hop count* vrednosti za jedan i difuzno reemituje ažurirani RREQ.

Ukoliko je D fleg jednak 0, a međučvor ima putanju do odredišnog čvora, upoređuje sekvencijalne brojeve odredišta – DSN (*Destination Sequence Numbers*) iz primljenog RREQ paketa i iz svoje tabele rutiranja. Ukoliko je DSN broj iz RREQ paketa veći od DSN broja iz tabele rutiranja međučvora, međučvor ima podatak o zastareloj ruti i ponaša se kao da je D fleg jednak 1. Međutim, ukoliko je DSN broj iz tabele rutiranja veći ili jednak od DSN broja iz primljenog RREQ paketa, međučvor generiše odgovor tj. RREP paket ka izvorišnom čvoru. U tom slučaju, međučvor generiše *unicast* RREP paket ka izvorišnom čvoru sa poljem *hop count* jednakim podatku o dužini putanje do odredišta koji je pročitao u svojoj tabeli rutiranja.

Ukoliko odredišni čvor primi RREQ paket, on prvo kreira (ili ažurira) svoju tabelu rutiranja podatkom o putanji do izvorišnog čvora. Vrednost *hop count* za taj podatak u tabeli rutiranja je vrednost *hop count* koja je dobijena u RREQ paketu uvećana za jedan. Odredišni čvor nakon toga generiše *unicast* RREP paket sa *hop count* vrednosti jednakoj 0, i šalje ga nazad ka izvorišnom čvoru.

Ukoliko je primljeni RREQ paket od istog izvorišnog čvora (i sa istim ID RREQ paketa) već viđen, i izvorišni i odredišni čvor odbacuju taj RREQ paket.

Kada međučvor primi RREP paket, on uvećava vrednost *hop count* u RREP paketu za jedan, kreira (ili ažurira) svoju tabelu rutiranja podatkom o putanji do odredišta, i prosleđuje ažurirani RREP paket ka izvorišnom čvoru. Kada izvorišni čvor primi RREP on tada ima putanju do odredišta i može početi sa slanjem paketa podataka.

Ukoliko neki čvor detektuje da je neki link u prekidu, on briše putanje u svojoj tabeli rutiranja koje sadrže taj link, i informiše susedne čvorove da je taj link u prekidu slanjem REER paketa.

### **3. Implementacija AODV-ETX protokola u NS-3**

Kako bi se ETX metrika koristila u okviru AODV protokola, potrebno je modifikovati protokol na nekoliko mesta.

#### **3.1. Implementacija LPP paketa i izračunavanje ETX polja**

Da bi se implementirala ETX metrika, potrebno je u NS-3 simulator prvo uključiti dodatne LPP pakete kojima se meri ETX, na prethodno opisani način.

Verovatnoće uspešnog prijema i slanja paketa u ETX metrici određuju se pomoću LPP paketa, koji je veličine 134 byte i nalazi se u *payload*-u 802.11b paketa [4]. Svaki čvor difuzno emituje po jedan LPP svake sekunde, i pamti broj primljenih LPP paketa od svojih suseda u poslenjih 10 sekundi. LPP paketi relativno su mali kako bi se uštedelo na propusnom opsegu i smanjio overhead u mreži. Struktura LPP paketa prikazana je na slici 1.

<i>Type</i> (8b)	
<i>LPP ID</i> (8b)	
<i>Number of neighbors</i> (n) (16b)	
<i>Originator IP Address</i> (32b)	
<i>Originator Sequence Number</i> (32b)	
<i>Neighbor IP Address 1</i> (32b)	n * 40b
<i>Forward LPP Count</i> (8b)	

Slika 1. Struktura LPP paketa

LPP paket sastoji se iz sedam polja:

- *Type* (vrsta AODV paketa),
- *LPP ID* (identifikacioni broj LPP paketa),
- *Number of Neighbors* (broj susednih čvorova čvora koji generiše LPP paket),
- *Originator IP Address* (IP adresa čvora koji generiše LPP paket),
- *Originator Sequence Number* (sekencijalni broj čvora koji generiše LPP paket),
- *Neighbor IP Address* (IP adrese susednih čvorova od kojih su primljeni LPP paketi u poslednjih 10 sekundi), i
- *Forward LPP count* (broj primljenih LPP paketa od svakog od suseda iz liste *Neighbor IP Address* koji su primljeni u poslednjih 10 sekundi).

Kako bi se odredila ETX metrika, u svakom čvoru, X, kreira se nova tabela suseda koja sadrži tri polja:

- *NeighborIpAddress* (koje sadrži IP adrese suseda čvora X)
- *ReverseLppCount* (polje koje prati broj LPP paketa koje je čvor X primio od svojih suseda u poslednjih 10 sekundi), i
- *ForwardLppCount* (polje koje prati broj LPP paketa koje su susedi čvorovi čvora X primili od njega u poslednjih 10 sekundi).

*ForwardLppCount* polje ažurira se na osnovu primljenih LPP paketa, kako je prethodno opisano u poglavlju 2. Kada čvor ima ove dve vrednosti za svakog svog suseda, može, u bilo kom trenutku, da izračuna ETX metriku do tog suseda.

### 3.2. Modifikacija tabele rutiranja, RREQ i RREP paketa

Kako bi se uključila ETX metrika u AODV-ETX protokol, potrebo je dodati ETX polje na nekoliko mesta u protokol.

Prvo je potrebno modifikovati tabelu rutiranja, tako što se svakom podatku u tabeli rutiranja (*routing table entry*) dodaje još jedno polje, ETX polje. U AODV protokolu podaci u tabeli rutiranja sortirani su po odredištima. Ukoliko postoji više putanja do istog odredišta, u osnovnom AODV protokolu te putanje bile su sortirane na osnovu dužine putanje (*hop count*), od najkraće ka najdužoj.

U AODV-ETX protokolu, putanje su idalje sortirane po odredištima, ali ukoliko postoji više putanja do istog odredišta, te putanje su sortirane po ETX vrednostima, od one sa najmanjom ETX vrednošću, do one sa najvećom. Ukoliko postoje dve putanje do

istog odredišta sa istom ETX vrednosti, one su u tabeli rutiranja sortirane po dužini putanje, tako da prvo ide najkraća.

Modifikacija RREQ i RREP paketa je jednostavna, dodatno polje, koje predstavlja ETX metriku, dodaje se u svakom paketu. Kada izvorišni čvor, S, kreira RREQ stavlja inicijalnu vrednost ETX polja na nulu. Ovo polje se dalje obrađuje i ažurira na sličan način kao polje *hop count*. Kako se RREQ paket dalje prosleđuje kroz mrežu ka odredišnom čvoru i ETX polje se ažurira u svakom čvoru na osnovu jednačine (3). Isti princip se koristi i kod prosleđivanja RREP paketa.

Iako je modifikacija samih paketa jednostavna, postoji dodatni problem oko kog treba voditi računa kada se u same pakete upisuje polje ETX. U RREQ i RREP paketima svi podaci su celobrojne vrednosti, a ETX vrednost u opštem slučaju nije celobrojna. Iz tog razloga, u okviru NS-3 potrebno je izvršiti serijalizaciju i deserijalizaciju paketa, odnosno predstaviti ETX polje u odgovarajućoj bitskoj predstavi.

Radi pojednostavljenja funkcije za (de)serijalizaciju implementirana je sledeća procedura: ETX polje ima fiksnu dužinu od 32 bita, vrednost ETX izračunata na osnovu jednačine (1) pomnožena je sa  $10^4$  i zaokružena na prvu celobrojnu vrednost. Korišćenjem celobrojnih vrednosti za ETX polje pojednostavljuje se implementacija u NS-3 simulator, a opisanim množenjem obezbeđuje se rezolucija od 4 decimalna broja.

U AODV-ETX protokolu, ETX je kumulativna vrednost, koja se računa kao suma ETX vrednosti linkova na izabranoj putanji, kao što je dato u jednačini (3). Zbog toga, ovako opisana implementacija je ograničena na mrežu od maksimalnih 4294 čvorova na putanji, što je najčešće više nego dovoljno za simulacije mreža.

### 3.3. Obrada RREQ i RREP paketa

Kao i kod osnovnog AODV protokola, RREQ i RREP pakete mogu primiti i međučvor i odredišni čvor.

Kada RREQ paket primi neki međučvor, M, on prvo izračuna ETX vrednost između sebe i čvora od kog je primio RREQ paket. Ova vrednost ETX izračunava se na osnovu IP adrese suseda i prethodno dobijenih *ForwardLppCount* i *ReverseLppCount* vrednosti. Nakon toga, čvor ažurira podatak u svojoj tabeli rutiranja do izvorišnog čvora sa novom ETX vrednosti koja predstavlja zbir izračunate ETX vrednosti do prethodnog čvora i ETX vrednosti iz primljenog RREQ paketa.

Kao i kod osnovnog AODV protokola, čvor M proverava u RREQ paketu D fleg. Ukoliko je njegova vrednost 1, čvor M ažurira primljeni RREQ sa novim ETX i novim *hop count*-om, i ponovo ga difuzno reemituje.

Ukoliko je D fleg jednak 0, čvor M ima putanju do odredišta u svojoj tabeli rutiranja, i DSN broj iz njegove tabele rutiranja je veći ili jednak od DSN iz primljenog RREQ paketa, čvor M generiše RREP paket i šalje ga ka izvorišnom čvoru. U taj RREP paket upisuju se vrednosti ETX i *hop count* ka odredišnom čvoru koje se očitavaju iz tabele rutiranja međučvora.

Ukoliko odredišni čvor D primi RREQ paket, on prvo kreira (ili ažurira) svoju tabelu rutiranja do izvorišnog čvora. Vrednost ETX za taj podatak u tabeli rutiranja predstavlja zbir ETX vrednosti iz primljenog RREQ paketa i ETX vrednosti za link između odredišnog čvora i susednog čvora od kog je primio RREQ paket. Ukoliko je ovo prvi RREQ paket koji je odredišni čvor primio za taj izvorišni čvor, odredišni čvor generiše RREP paket sa ETX i *hop count* vrednostima jednakim 0.

U osnovnom AODV protokolu, i međučvor i odredišni čvor ne odgovaraju na bilo koji drugi RREQ paket dobijen za isti izvorišni čvor (i sa istim ID). U AODV-ETX protokolu, ukoliko čvor primi RREQ od već viđenog izvorišnog čvora, na njega odgovara ukoliko je vrednost ETX polja u primljenom RREQ manja od ETX vrednosti za taj izvorišni čvor u tabeli rutiranja. Takođe, ukoliko je primljena vrednost ETX iz RREQ paketa ista kao vrednost iz tabele rutiranja, ali je vrednost iz RREQ paketa za *hop count* manja, čvor koji je primio RREQ dalje će ga proslediti.

Kada međučvor primi RREP paket, povećava mu *hop count* za jedan, ažurira ETX vrednost dodavanjem na primljenu vrednost ETX iz RREP paketa vrednost ETX za link između njega i susednog čvora od kog je primio RREP, kreira (ili ažurira) svoju tabelu rutiranja za putanju do odredišnog čvora i prosleđuje ažurirani RREP paket ka izvorišnom čvoru.

Kako bi se minimizovala latentnost, izvorišni čvor će pakete podataka slati odmah nakon prijema prvog RREP paketa. Međutim, ukoliko mu stigne dodatni RREP koji ima bolju metriku, tabela rutiranja izvorišnog čvora će se osvežiti boljom putanjom i ta putanja će se koristiti za naredna slanja paketa podataka.

#### 4. Evaluacija

U ovom poglavlju dati su simulacioni rezultati poređenja AODV-ETX i AODV protokola.

##### 4.1 Simulacioni setap

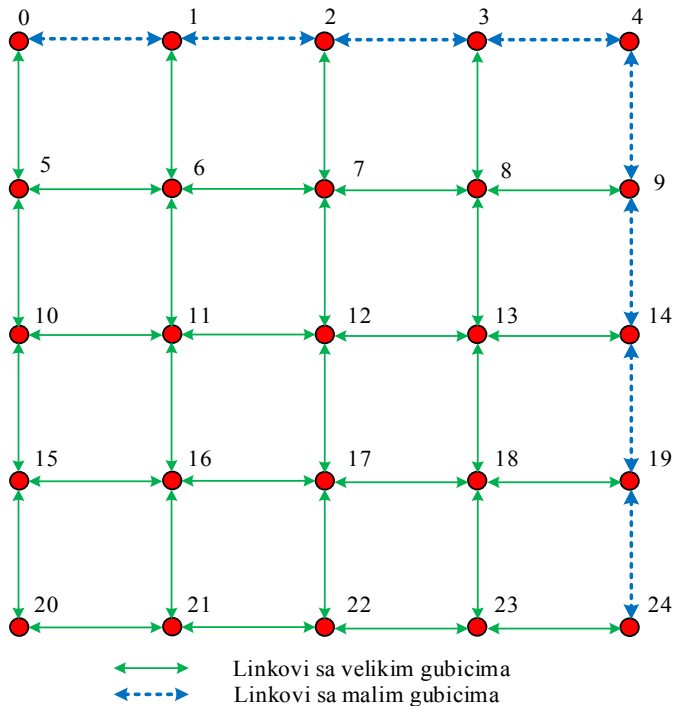
Za analizu i implementaciju korišćen je NS-3.26 simulator. Parametri modela koji su korišćeni u eksperimentima dati su u Tabeli 1. Za testiranje ponašanja AODV-ETX protokola, u ovom radu, analizirana je jednostavna mreža koja se sastoji iz 25 čvorova, raspoređenih kao na slici 2. Saobraćaj je generisan od čvora 24 ka čvoru 0, i rezultati simulacija (protok, kašnjenje i gubitak paketa) dobijeni su korišćenjem *FlowMonitor*-a.

U cilju testiranja selektovanje putanje na osnovu ETX metrike, analizirana je mrežna topologija kod koje linkovi imaju različite gubitke. Kod izabrane mreže za testiranje, linkovi između čvorova 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-9, 9-14, 14-19 i 19-24 predstavljaju linkove čiji su gubici mali, čime se formira putanja sa manjom ETX metrikom. Ostali linkovi na slici 2 predstavljaju linkove sa većim gubicima čime je i njihova metrika veća.

*Tabela 1. Ulazni parametri simulacija*

<b>Parametar</b>	<b>Vrednost</b>
Protokol rutiranja	AODV, AODV-ETX
MAC protokol	IEEE 802.11 b
Vreme simulacije	100 s
Broj čvorova	25
Propusni opseg	2 Mbps
Generisani saobraćaj	CBR
Veličina paketa	512 bytes

Očekivano je da AODV-ETX protokol bira putanju 24-19-14-9-4-3-2-1-0 za najbolju putanju (putanju sa najmanjom ETX metrikom) i da obezbedi najbolje mrežne performanse.



Slika 2. Testirana mreža

## 4.2 Rezultati

Kako bi se testirala implementacija ETX metrike u okviru AODV protokola, izvršene su simulacije pod različitim saobraćajnim opterećenjima, kao što je prikazano u Tabeli 2.

Tabela 2. Rezultati simulacija.

Opterećenje podataka [kbps]	Protokol	Hop count	ETX	Kašnjenje s kraja na kraj [ms]	Protok [kbps]	Gubitak paketa [%]
10	AODV	8	-	54,16	10,61	1,05
10	AODV-ETX	8	8,11	45,04	10,73	0,82
15	AODV	8	-	50,35	15,95	1,82
15	AODV-ETX	8	8,11	43,73	15,98	1,37
20	AODV	8	-	46,54	21,22	2,07
20	AODV-ETX	8	11,09	43,54	21,23	1,64
30	AODV	8	-	42,73	31,75	2,85
30	AODV-ETX	8	8,22	33,89	31,80	1,78



Vidi se da su i AODV i AODV-ETX protokol izabrali putanje dužine osam skokova, ali dok AODV protokol slučajno bira putanju, AODV-ETX uvek bira putanju 24-19-14-9-4-3-2-1-0. To je i očekivano jer ova putanja sadrži linkove čiji su gubici manji, pa samim tim i najbolju ETX metriku. Iako su oba protokola izabrala putanje iste dužine (8), imajući u vidu da AODV protokol ne favorizuje putanje sa malim gubicima, simulacioni rezultati pokazuju da on bira putanje sa većim kašnjenjem i gubitkom paketa ego kod putanja koju je izabrao AODV-ETX protokol.

Ipak, kako se u okviru AODV-ETX protokola generišu dodatni LPP paketi, u okviru AODV-ETX protokola veći je i overhead.

## 5. Zaključak

Osnovni cilj ovog rada je da opiše detaljnu implementaciju ETX metrike u NS-3 simulator. Da bi se testirala implementacija osnovni AODV protokol upoređen je sa AODV-ETX protokolom (AODV protokol koji koristi ETX metriku).

Kao što je očekivano, AODV-ETX daje bolje performanse u odnosu na AODV protokol po pogledu kašnjenja s kraj na kraj i procenta izgubljenih paketa, dok AODV protokol daje bolje performanse po pitanju overheda u mreži.

Imajući u vidu da su rezultati simulacija pokazali očekivano ponašanje mreže, može se zaključiti da je implementacija ETX metrike u NS-3 simulator bila uspešna i da se može koristiti za ostale implementacije i modifikacije protokola koji se zasnivaju na AODV protokolu, kao i metrika koje se zasnivaju na ETX metrici. U narednom koraku planira se implementacija dodatnih metrika u NS-3 simulator, kao i implementacija ETX metrike i drugih metrika u NS-3 simulator, ali u okviru *Dinamic Source Routing* (DSR) protokola i drugih sličnih protokola.

## Literatura

- [1] I.F. Akyildiz, X.Wang, "A Survey on Wireless Mesh Networks", *IEEE Comm. Magazine*, Vol. 3, No. 9, Sep. 2005, pp. S23–S30.
- [2] M.Portman, *Wireless Mesh Networks for Public Safety and Disaster Recovery Applications*, Auerbach Publications, 2006.
- [3] Y.Yang, J.Wang, R.Kravets, "Designing Routing Metrics for Mesh Networks", *Proc.of the IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks (WiMesh)*, 2005, Available at: [www.cs.ucdavis.edu/~prasant/WIMESH/p6.pdf](http://www.cs.ucdavis.edu/~prasant/WIMESH/p6.pdf)
- [4] S. J. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, R. Morris. "A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing", *Wireless Networks*, Vol. 11, No 4, 2005, pp. 419–434.
- [5] OMNeT++ [Online]. Available: <http://www.omnetpp.org>.
- [6] GlomoSim. [Online]. Available: <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/domains/glomosim.htm>
- [7] NS-2 Network Simulator. [Online]. Available: <https://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [8] NS-3 Network Simulator. [Online]. Available: <http://www.nsnam.org/>
- [9] C. E. Perkins, E.M. Belding–Royer, S.R. Das, "Ad Hoc On demand Distance Vector (AODV) routing", *RFC 3561*, 2003.

**Abstract:** *Wireless ad hoc networks (WANETs) are one of the most used networks in everyday life. In last decades, many routing protocols and metrics for WANETs are proposed in order to provide users with fast throughput and small delay. In order to test to test performance of the proposed protocols in various network scenarios and to evaluate their significance and practical value, common practice is to use computer simulation. Therefore, many discrete-event network simulators can be found. One of the very frequently used network simulator is Network Simulator 3 (NS-3). This simulator is developed mostly for educational and research purposes. In this paper, the possibilities of NS-3 simulator extensions based on the AODV (Ad-hoc on demand distance vector) protocol in term of link-quality metrics implementation that improve the performance of the WANET networks are considered.*

**Keywords:** *wireless ad hoc networks, NS-3, link-quality metric, AODV protocol.*

### **NS-3 SIMULATOR FUNCTIONALITY EXTENSION FOR ROUTING IN AD- HOC WIRELESS NETWORKS**

Marija Malnar, Nenad Jevtić