

Uporedna analiza *Hop counting*, ETX, ETT i MIC metrike u realnom propagacionom okruženju jednokanalne mesh mreže

Marija Z. Malnar¹, Nataša J. Nešković², *Member, IEEE*

Sadržaj — U ovom radu izvršena je procena performansi tehnika rutiranja u okviru *mesh* mreža. Poređena su dva protokola: DSR (*Dynamic Source Routing*) protokol koji koristi *Hop counting* metriku za određivanje optimalne putanje, kao i njegova modifikacija, LQSR (*Link Quality Source Routing*) protokol, koji koristi metrike: ETX (*Expected Transmission Count*), ETT (*Expected Transmission Time*) i MIC (*Metric of Interference and Channel-switching*). Kvalitet radio linka između dva čvora računat je uzimajući u obzir propagacioni model razvijen za specifično *indoor* okruženje. U Glomosim simulatoru izvršeno je poređenje pomenutih metrika u pogledu brzine protoka korisničkih podataka i kašnjenja kroz *mesh* mrežu.

Ključne reči - *indoor* propagacioni model, metrika, rutiranje.

I. UVOD

Bežične *mesh* mreže (*Wireless Mesh Networks* - WMN) imaju sve širu primenu u javnim mrežama, u mrežama za bezbednost, i sl. [1, 2]. Definisanjem adekvatnog protokola rutiranja ostvaruje se bolje konfigurisanje i kontrolisanje mrežne topologije.

Protokoli rutiranja mogu da koriste različite metrike rutiranja pomoću kojih se određuje optimalna putanja od izvora do odredišta. Na metriku utiču karakteristični parametri linka: verovatnoća gubitka paketa, *inter-flow* ili *intra-flow* interferencija, kašnjenje, potrošnja snage i sl.

U cilju dobijanja što optimalnijih, ali i realnijih parametara koji su predmet analize, potrebno je u proračun uračunati i uticaj sredine na propagaciju radio talasa. Zato je neophodno definisati propagacioni model, koji će odgovarati realnim uslovima.

U ovom radu analizirana su dva jednokanalna jedointerfejsna protokola za WMN mreže. DSR (*Dynamic Source Routing*) protokol [3], koji koristi *Hop counting* metriku za određivanje optimalne putanje, i njegova modifikacija LQSR (*Link Quality Source Routing*) protokol [4]. U simulacioni paket Glomosim [5] implementiran je LQSR protokol, kao i tri metrike koje on može da koristi: ETX – *Expected Transmission Count* [6], ETT – *Expected Transmission Time* [4] i MIC - *Metric of*

Interference and Channel-switching [7]. Za potrebe analize ovih metrika u realnom *indoor* okruženju, razvijen je propagacioni model koji je, takođe, implementiran u Glomosim [5] simulator. Parametri propagacionog modela određeni su na osnovu merenja na realnoj mreži na Elektrotehničkom fakultetu koja je realizovana u frekvencijskom opsegu 2.4GHz. Metrike su upoređene po pitanju ostvarivih protoka korisničkih podataka i kašnjenja kroz *mesh* mrežu.

U drugom poglavlju ukratko su opisani DSR i LQSR protokoli, kao i *HOP counting*, ETX, ETT i MIC metrika. U trećem poglavlju definisan je *indoor* propagacioni model, njegova matematička formulacija i način određivanja parametara. U četvrtom poglavlju definisana je konfiguracija mreže i ulazni parametri za Glomosim simulacioni paket. U petom poglavlju data je analiza dobijenih protoka i kašnjenja u mreži pri korišćenju sve četiri metrike. U šestom poglavlju dat je zaključak kao i predlozi za dalji rad.

II. DSR I LQSR PROTOKOLI

Osnovni cilj protokola rutiranja je otkrivanje i provera logičke topologije mreže, kao i definisanje mehanizama za kreiranje i osvežavanje putanja.

DSR je jednostavan i efikasan protokol rutiranja posebno dizajniran za primenu u bežičnim mrežama [3]. Primenom DSR protokola mreža je potpuno samooorganizovana i može se sama konfigurisati, pa nema potrebe za dodatnom infrastrukturom u mreži, kao ni administriranjem mreže. Ako čvorovi mreže nisu susedni, prenos podataka ostvaruje se preko drugih čvorova mreže, koji su u radio dometu jedan drugom. DSR protokol može brzo da reaguje na promene u mreži. To je važno jer se topologija bežičnih mreža brzo menja usled česte promene uslova radio-linkova.

Kod LQSR [4] protokola zadržani su svi mehanizmi koji postoje u DSR protokolu, s tim što se pored adrese čvorova kroz koje paketi prolaze, prenose i cene linkova. Osnovni mehanizmi koji postoje u DSR i LQSR protokolu detaljno su opisani u [8].

Metrikom rutiranja treba odrediti cene linkova, koje mogu da zavise od različitih parametara (verovatnoća gubitka paketa, *inter-flow* ili *intra-flow* interferencija, kašnjenje, potrošnja snage...), kao i kriterijum po kom je neka putanja optimalna. Kod svih metrika koje su obrađene u ovom radu, optimalna je putanja sa najmanjom

¹Marija Z. Malnar zaposlena je na Saobraćajnom fakultetu, Univerziteta u Beogradu, Vojvode Stepe 305, 11000 Beograd, Srbija, E-mail: m.malnar@sf.bg.ac.rs

²Natasa Neskovic zaposlena je na Elektrotehničkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 83, 11000 Beograd, Srbija, E-mail: natasha@ctf.rs

sumom cena linkova na putu od izvorišnog do odredišnog čvora.

A. Hop counting

Hop counting je tradicionalna metrika rutiranja koja se koristi kod poznatih protokola rutiranja kao što je DSR. Dizajnirana je za mreže sa višestrukim skokovima. Ona pronalazi putanju sa najmanjim brojem skokova, odnosno najkraću putanju.

B. ETX metrika

ETX metrika se primenjuje nad protokolom LQSR. Pronalazi putanje sa najmanjim brojem retransmisija paketa potrebnih da se paket uspešno pošalje od izvorišnog do odredišnog čvora [6]. Broj retransmisija paketa duž linka određuje se merenjem gubitaka paketa u oba smera za svaki link u mreži. Cena linka izračunava se kao:

$$ETX = \frac{1}{d_f \times d_r} \quad (1)$$

gde je d_f verovatnoća da paket uspešno stigne do čvora kome je poslat, a d_r verovatnoća da ACK paket uspešno stigne do čvora koji je inicirao slanje. Detaljnije određivanje d_f i d_r , kao i formiranje cene linka opisano je u [8].

C. ETT metrika

ETT [4] metrika je modifikacija ETX metrike koja uzima u obzir i različite kapacitete linkova. ETT predstavlja očekivano vreme potrebno da se paket uspešno prenese na MAC sloju. Za link, sa cenom ETX, ETT se računa kao $ETT=ETX \cdot S/B$, gde je S prosečna veličina paketa, a B propusni opseg linka koji se posmatra.

D. MIC merika

MIC metrika [7] se sastoji iz dve komponente: *Interference aware Resource Usage* (IRU) kojom metrika u obzir uzima posledice *inter-flow* interferencije, i *Channel Switching Cost* (CSC) kojom se u metriku uračunavaju posledice *intra-flow* interferencije.

IRU komponenta računa ukupno očekivano vreme prenosa na nekom kanalu c , između čvorova i i j , uzimajući u obzir uticaj onih suseda čvora i , koji stvaraju interferenciju signalu koji se prenosi na kanalu c . Prema tome, IRU predstavlja *inter-flow* interferenciju na kanalu c . $N_i(c)$ je skup suseda čvora i koji stvaraju interferenciju kada čvor i šalje podatke preko kanala c . $|N_i(c) \cup N_j(c)|$ je ukupan broj susednih čvorova koji mogu da stvaraju interferenciju prilikom slanja podataka između čvorova i i j preko kanala c . Tada je IRU na kanalu c za par čvorova (i,j) :

$$IRU_{ij}(c) = ETT_{ij}(c) \times |N_i(c) \cup N_j(c)| \quad (2)$$

CSC komponenta uzima u obzir uticaj *intra-flow* interferencije. Neka je $prev(i)$ prethodni čvor čvora i , a $CH(i)$ kanal koji čvor i koristi za prenos podataka do sledećeg čvora. Tada je CRC čvora i :

$$CRC_i = \begin{cases} \omega_1, & CH(prev(i)) \neq CH(i) \\ \omega_2, & CH(prev(i)) = CH(i) \end{cases}, \quad 0 \leq \omega_1 < \omega_2 \quad (3)$$

Veza $\omega_1 < \omega_2$ treba da posluži da u slučaju da čvor i

emituje podatke na istom kanalu po kom su mu podaci stigli, on povećava *intra-flow* interferenciju, u odnosu na slučaj kada za predaju i prijem koristi različite kanale. Kako je u ovom radu implementirana jednodimenzionalna mreža, ova komponenta je ista za sve putanje, i nema uticaj na odabir optimalne putanje.

Kombinacijom IRU i CRC definiše se MIC putanje p kao:

$$MIC(p) = \frac{1}{N_n \times \min ETT} \sum_l IRU_l + \sum_i CRC_i \quad (4)$$

gde je N_n broj čvorova u mreži, $\min ETT$ najmanji ETT u mreži, prva suma je suma po l linkovima koji se nalaze na putanji p , a druga suma je suma po i čvorova koji se nalaze na putanji p .

III. INDOOR PROPAGACIONI MODEL

U cilju dobijanja realnijih parametara sistema, u ovom slučaju protoka i kašnjenja u mreži koja koristi neki od gore navedenih protokola rutiranja i odgovarajuću metriku, implementiran je *indoor* propagacioni model u skladu sa strukturom *indoor* okruženja u okviru koga je analizirana *mesh* mreža (model predstavlja implementaciju rešenja predloženog u [9] na specifično *indoor* okruženje). U modelu su razmatrana dva slučaja: kada između predajnika i prijemnika postoji direktna optička vidljivost (LoS - *Line of Sight*), i kada je prijemnik u „senci“ u odnosu na predajnik (NLoS - *Non Line of Sight*). U slučaju NLoS uslova propagacije, nivo signala na ulazu u prijemnik uzima u obzir uticaje različitih tipova okruženja na propagacionom putu od predajnika do prijemnika.

U LoS slučaju slabljenje između predajnika i prijemnika računa se po standardnoj formuli:

$$L_{los} = 20 \log \frac{4\pi d}{\lambda}, \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad (5)$$

gde je f radna frekvencija predajnika, d rastojanje između predajnika i prijemnika, a c brzina svetlosti.

Nivo snage signala na ulazu u prijemnik, P_r , je:

$$P_r = P_t + G_t - L_{los} + G_r \quad (5)$$

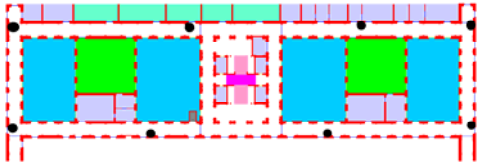
gde su: P_t snaga signala na izlazu iz predajnika, G_t i G_r dobici predajne i prijemne antene, i L_{los} gubici na trasi između predajnika i prijemnika.

U slučaju NLoS uslova propagacije, matematički model koji opisuje slabljenje između predajnika i prijemnika u *indoor* propagacionom okruženju zasniva se na određivanju parametara modela za različite tipove enterijera: laboratorije, učionice, prozori, vrata, zidovi...

U cilju određivanja parametara *indoor* propagacionog modela izvršena su merenja na realnoj mreži realizovanoj na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu u frekvencijskom opsegu 2.4GHz. Mereni su nivoi snage signala na prijemu u 403 tačke, za četiri orijentacije antene, pri čemu je u daljem proračunu uzeta srednja vrednost. Merenje je vršeno za svaki od 8 predajnika i dobijeno je 3224 rezultata merenja [10]. Iz baze su izbačeni rezultati kod kojih nivo polja ispod praga prijema. Pored toga, za potrebe formiranja propagacionog modela, korišćene su merne tačke čije su pozicije odgovarale karakterističnim pozicijama za formiranje

modela. Na taj način selektovan je 601 merni rezultat. Za svaki od tih rezultata merenja formirana je jedna jednačina propagacije signala od predajnika do prijemnika.

Na Sl. 1. dat je plan prizemlja zgrade Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, pri čemu su različite vrste propagacionih sredina i prepreka, kao elemenata enterijera, prikazane različitim bojama. Trebalo je odrediti vrednosti parametra modela: m_1, \dots, m_8, L_w , koji karakterišu propagaciju signala kroz laboratorije (ljubičaste boje), učionice (tirkizne boje), hodnike (bele boje), lift (tamno sive boje), amfiteatre (zelene boje), svetlarnike (plave boje), stepenište koje vodi do podruma Fakulteta (tamno ljubičaste boje), stepenište koje vodi do prvog sprata Fakulteta (svetlo roze boje), i zid (crvene boje), respektivno.



Sl. 1. Plan prizemlja u zgradi Elektrotehničkog fakulteta i raspored čvorova u mreži.

Problem se svodi na rešavanje predimenzioniranog sistema jednačina koji ima $p=601$ jednačina i $q=9$ nepoznatih. Svaka od p jednačina je oblika:

$$20 \log \frac{4\pi d_0}{\lambda} + m_1 \log d_1 + m_2 \log d_2 + \dots + m_{q-1} \log d_{q-1} + N_w L_w = P_t + G_t + G_r - P_r \quad (6)$$

P_t i P_r su nivoi snage signala na predaji i prijemu, respektivno, G_t i G_r su dobici predajne i prijemne antene, respektivno, λ talasna dužina, d_0 dužina propagacije signala do prve prepreke, $d_1 \dots d_{q-1}$ dužine propagacije signala kroz ostala okruženja, N_w broj zidova na putanji, L_w jedinično slabljenje kroz zid. Svaka jednačina se formira na osnovu analize trase od predajnika do prijemnika. Ako se duž konkretne trase talas ne prostire kroz neki tip okruženja, u jednačini ne figuriše sabirak koji opisuje slabljenje kroz to okruženje.

U radu [9] u obzir je uzimano samo slabljenje kroz zidove, pa iz tog razloga u ovoj analizi nisu uzimana u obzir slabljenja usled prolaska talasa kroz prozore i vrata, već se smatra da će broj prozora i vrata u nekoj prostoriji uticati na parametar prostiranja u toj prostoriji. Jednačine se dalje svode na:

$$m_1 a_1 + m_2 a_2 + m_3 a_3 + m_4 a_4 + \dots + m_{q-1} a_{q-1} + N_w L_w = b \quad (7)$$

Tako se dobija sistem od p jednačina sa q nepoznatih:

$$m_1 a_{11} + m_2 a_{12} + m_3 a_{13} + m_4 a_{14} + \dots + m_{q-1} a_{1q-1} + N_w L_w = b_1 \quad (8)$$

...

$$m_1 a_{p1} + m_2 a_{p2} + m_3 a_{p3} + m_4 a_{p4} + \dots + m_{q-1} a_{pq-1} + N_w L_w = b_p$$

Da bi se rešio predimenzionirani sistem jednačina potrebno je pronaći sve sisteme jednačina sa q nepoznatih [11]. Kako je broj jednačina p , različitih sistema jednačina ima koliko i kombinacija bez ponavljanja skupa od p elemenata od kojih se bira q elemenata. Kada se reše svi sistemi jednačina dobija se p nad q uređenih q -torki rešenja. Svaka q -torka se dalje zamenjuje u svih p jednačina i bira se q -torka koja daje najmanju srednju kvadratnu grešku. Ovakvo rešavanje sistema jednačina je veoma komplikovano, pa je primenjen drugi način, koji

daje jednako tačno rešenje [11].

Formira se funkcija:

$$\begin{aligned} \varphi(m_1, m_2, m_3, \dots, m_{q-1}, L_w) = \\ = (m_1 a_{11} + m_2 a_{12} + m_3 a_{13} + m_4 a_{14} + \dots + m_{q-1} a_{1q-1} + N_w L_w - b_1)^2 + \\ \dots \\ + (m_1 a_{p1} + m_2 a_{p2} + m_3 a_{p3} + m_4 a_{p4} + \dots + m_{q-1} a_{pq-1} + N_w L_w - b_p)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Dalje se traže parcijalni izvodi funkcije $\varphi(m_1, m_2, \dots, m_{q-1}, L_w)$ po svim parametrima. U cilju dobijanja parametara koji daju najmanju srednju kvadratnu grešku, traže se minimumi ovako dobijenih parcijalnih izvoda. Na ovaj način dobija se sistem od q jednačina i q nepoznatih koji daje jednoznačno rešenje i tako se dobijaju vrednosti parametara *indoor* propagacionog modela date u Tabeli 1. Čitav postupak dobijanja parametara implementiran je korišćenjem programskog paketa MatLab.

TABELA 1: Vrednosti parametara *indoor* propagacionog modela.

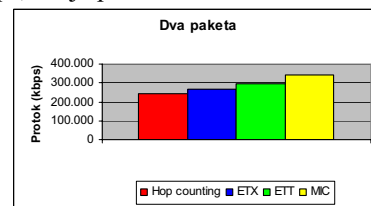
Parametar	m_1	m_2	m_3	m_4	
r					
Vrednost	24.3	20.04	7.37	296.9	
Parametar	m_5	m_6	m_7	m_8	L_w
r					
Vrednost	33.77	10.1	-1.33	24.38	14.16

IV. DEFINISANJE MREŽE I ULAZNIH PARAMETARA U GLOMOSIM SIMULATORU

Analizirana je mreža formirana po ugledu na realnu mrežu na prizemlju Elektrotehničkog fakulteta, koja se sastoji iz 8 stacionarnih čvorova, raspoređenih u prostoru dimenzija 120m×42m, kao na Sl.1. Koordinate čvorova su unapred zadate i učitane iz posebne datoteke. Svaki čvor ima jedan 802.11 kanal, koji radi na frekvenciji 2.4GHz. Kapacitet kanala 2Mbps. Za analizu protoka i kašnjenja kroz *mesh* mrežu korišćen je Glomosim [5] simulator. Pored postojećeg DSR protokola i Hop *counting* merike, u Glomosim su implementirani *indoor* propagacioni model, LQSR protokol i metrike: ETX, ETT i MIC. Izvršena je simulacija TCP prenosa podataka, i to za slučajeve kada se šalju 2 paketa ili 4 paketa. Trajanje simulacije svakog prenosa je 400s.

V. REZULTATI I ANALIZA

Simulacija DSR protokola korišćenjem HOP *counting* i LQSR protokola korišćenjem ETX, ETT i MIC metrike uz primenu *indoor* propagacionog modela dala je sledeće rezultate. Medijana protoka koja se dobija kada se šalju se dva paketa iznosi: za HOP *counting* 244.395kbps, za ETX 268.567kbps, za ETT 293.275kbps, i za MIC 342.154kbps, što je prikazano na Sl. 2.

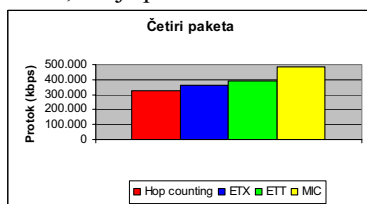


Sl. 2. Medijana protoka kada se šalju 2 paketa. Medijana protoka koja se dobija kada se šalju četiri

paketa iznosi: za *HOP counting* metriku je 326.576kbps, za ETX 358.875kbps, za ETT 391.891kbps, a za MIC 483.332kbps, što je prikazano na Sl. 3.

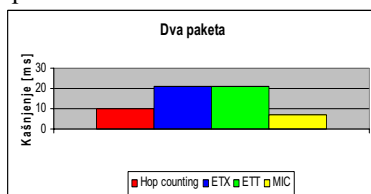
Medijana protoka veća je u slučaju kada se šalje više paketa, što se objašnjava činjenicom, da procedura oko otkrivanja optimalne putanje u mreži traje isto vreme, zauzima iste resurse, nezavisno od toga koliko se paketa šalje.

Pored protoka, analiza metrike izvršena je i sa stanovišta kašnjenja paketa kroz *mesh* mrežu, i dobijeni su sledeći rezultati. Kašnjenje kada se šalju dva paketa iznosi: za *HOP counting* metriku je 10ms, za ETX i ETT 21ms, a MIC 7ms, što je prikazano na Sl. 4.



Sl. 3. Medijana protoka kada se šalju 4 paketa.

Kašnjenje kada se šalju četiri paketa iznosi: za *HOP counting* metriku je 23ms, za ETX i ETT 52ms, a MIC 19ms, što je prikazano na Sl. 5.



Sl. 4. Kašnjenje kada se šalju 2 paketa.

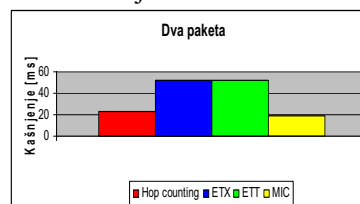
Najveća medijana protoka ostvarena je primenom MIC metrike, koja je za oko 45% bolja od *HOP counting* metrike. ETT metrika je oko 20% bolja od *HOP counting*, dok je ETX dala za oko 9% bolje rezultate. I u pogledu kašnjenja MIC metrika je dala najbolje rezultate. Kašnjenje je kod *HOP counting* metrike manje nego kod ETT i ETX, jer se manje kontrolnih paketa šalje primenom *HOP counting* metrike. Iako postoje dodatni kontrolni paketi kod MIC metrike, ona daje bolje rezultate jer se biraju linkovi koji imaju manju interferenciju, pa samim tim se i brže šalju paketi duž tih linkova.

VI. ZAKLJUČAK

U radu je data uporedna analiza četiri metrike za jednokanalne jednointerfejsne *mesh* mreže. Kvalitet radio linka između dva čvora računat je uzimajući u obzir realni propagacioni model. Analizirana je mrežna topologija kod koje raspored čvorova odgovara realnom rasporedu čvorova mreže koja postoji u zgradi Elektrotehničkog fakulteta. Zaključeno je da su i medijana protoka i kašnjenje najbolji u slučaju MIC metrike, jer ona u cenu težinu linka uzima i *intra flow* interferenciju, koje ne obuhvataju druge metrike.

ETT je nadogradnja ETX metrike, dok je MIC nadogradnja ETT metrike. U literaturi se mogu naći i mnoge druge modifikacije ETX metrike, koje su implementirane u višekanalnim višeinterfejsnim mrežama. Nasuprot tome, u literaturi se najčešće koristi *two ray*

propagacioni model, iako se analiziraju *indoor* mreže. Dalja istraživanja usmerena su ka implementiranju višekanalnog i višeinterfejsnog mesh protokola u Glomosim simulacioni paket, kao i analizi različitih metrika za višekanalne protokole u realnom propagacionom okruženju.



Sl. 5. Kašnjenje kada se šalju 4 paketa.

LITERATURA

- [1] I.F. Akyildiz, X.Wang, "A Survey on Wireless Mesh Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, No. 9, Sept. 2005, pp. S23-S30
- [2] M.Portmann, *Wireless Mesh Networks for Public Safety and Disaster Recovery Applications*, Auerbach Publications (CRC Press), 2006.
- [3] D. Johnson, "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4," RFC 4728, *Microsoft Research*, Feb 2007
- [4] R.Draves, J.Padhye, B.Zill, "Comparison of Routing Metrics for Static Multi Hop Wireless Networks", *Proc. of ACM SIGCOMM*, Portland, Oregon, USA, Sep. 2004, pp. 133-144.
- [5] Glomosim simulator, Available for download at: <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/domains/glomosim.htm>.
- [6] S. J. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris. "High-throughput path metric for multi-hop wireless routing". In *MOBICOM*, Sep 2003..
- [7] Y. Yang, J. Wang and R. Kravets, "Load-balanced Routing for Mesh Networks," In *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications review*, Volume 10, Number 4, Oct. 2006.
- [8] N. Nešković, A. Nešković, M. Malnar, "Analiza ETX metrike u realnom propagacionom okruženju mesh mreže," *Zbornik radova sa konferencije Postel*, Dec. 2009, pp. 267 – 276.
- [9] William C.Y. Lee, David J.Y. Lee, "Inbuilding Prediction", *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIRMC, 7th IEEE International Symposium*, Taipei, Taiwan, Oct. 1996, vol 3, pp. 771 – 775.
- [10] M. Borenovic, A. Neskovic, "Indoor georeferenced RSSI database". Available online at: <http://telekomunikacije.etf.rs/research/wlanpositioning/rssiDatabase.zip>
- [11] J. Neter, M.H. Kunter, C. J. Nachtsheim, W. Wasserman, "Applied Linear Statistical Model", Chicago, Irwin, 1996.

ABSTRACT

In this paper performance of few routing tehnicns were performed. Two routing protocols are compared: DSR (Dynamic Source Routing) protocol, which uses HOP counting metric, and its modification, LQSR (Link Quality Source Routing) protocol. LQSR protocol uses metrics: ETX (Expected Transmission Count), ETT (Expected Transmission Time) and MIC (Metric of Interference and Channel-switching). Link quality between two nodes was calculated taking into account the propagation model proposed in this paper. The throughput and delay through mesh network, when these metrics were used, were compared using Glomosim simulator.

COMPARATIVE ANALYSIS OF HOP COUNTING, ETX, ETT AND MIC METRICS IN REAL PROPAGATION ENVIRONMENT OF SINGLE CHANNEL MESH NETWORK

Marija Z. Malnar, Nataša J. Nešković