

PREGLED METRIKA RUTIRANJA ZA VIŠEKANALNE VIŠEINTERFEJSNE BEŽIČNE MESH MREŽE

Marija Z. Malnar ^{a,b}, Nataša J. Nešković ^a

^a Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd

^b Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd

e-mail: m.malnar@sf.bg.ac.rs; natasha@etf.rs

DOI: 10.5937/vojtehg63-7448

OBLAST: telekomunikacije

VRSTA ČLANKA: originalni naučni članak

JEZIK ČLANKA: srpski

Sažetak:

Bežične mesh mreže – WMNs (*Wireless Mesh Networks*) predstavljaju noviji trend u bežičnim komunikacijama kojim se obezbeđuju veća fleksibilnost, pouzdanost i bolje performanse nego standardnim bežičnim lokalnim mrežama. Imajući u vidu sve veće potrebe korisnika za brzim i efikasnim prenosom podataka, povećanje protoka, ostvarenje uvođenjem višekanalnih višeinterfejsnih – MCMI (*Multi-Channel Multi-Interface*) WMNs, predstavlja glavni izazov u projektovanju WMNs. Kako bi se ostvarile što bolje mrežne performanse neophodno je definisati protokole i metrike rutiranja kojima se određuje optimalna putanja između izvorišnog i odredišnog čvora. S obzirom na to da WMN karakteriše velika dinamika signala, posebno kada se realizuju u kompleksnim okruženjima kakva su zatvoreni objekti, neophodno je definisati metrike rutiranja koje mogu da isprate brze promene uslova propagacije koje se dešavaju na svakom pojedinačnom linku u mreži. U ovom radu predstavljen je kritički osvrt na najpoznatije metrike rutiranja za MCMI bežične mesh mreže. Navedeni su osnovni kriterijumi za formiranje metrika rutiranja, kao što su: interferencija, količina informacija, opterećenje linka, agilnost, stabilnost i sposobnost praćenja brzih promena na svakom linku. Opisani su i novi trendovi u razvoju metrika rutiranja za bežične mesh mreže, kao i poređenje opisanih metrika u skladu sa prethodno pomenutim kriterijumima. Na kraju rada predstavljena su zaključna razmatranja.

Ključne reči: kanal, protokoli rutiranja, bežične mesh mreže, rutiranje, metrike, interferencija.

* ZAHVALNICA: Autor se zahvaljuje za finansijsku podršku, Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (naziv projekta: Razvoj novih metoda i alata za unapređenje performansi, mrežne i ekonomske efikasnosti telekomunikacionih mreža naredne generacije, TR32025).

Uvod

Primena bežičnih komunikacija raste svakim danom i može se reći da savremeno društvo ne bi funkcionisalo bez njih. Potrebu za sve većim kapacitetima bežičnih komunikacionih mreža povećavaju laptop uređaji, tablet računari, mobilni telefoni i slični uređaji. Usled porasta popularnosti bežičnih mreža, sve su aktuelniji zahtevi korisnika za velikim protocima podataka. Sa druge strane, cena bežičnih uređaja je u opadanju, pa i ta činjenica dodatno podstiče sve veće razmene saobraćaja bežičnim putem.

Bežične *mesh* mreže – WMNs (*Wireless Mesh Networks*) predstavljaju noviji trend u bežičnim komunikacijama koji obezbeđuje veću fleksibilnost, pouzdanost i bolje performanse u poređenju sa standardnim bežičnim lokalnim mrežama. Mreže koje rade sa jednim radio-interfejsom (primopredajnikom) i na jednom radio-kanalu više ne mogu da zadovolje sve veće zahteve korisnika za velikim protocima i brzim i efikasnim prenosom podataka. Zato se sve veća pažnja posvećuje razvoju tzv. višekanalnih višeinterfejsnih mreža, u okviru kojih svaki čvor ima više radio-interfejsa koji mogu da rade na više radio-kanala.

Analize protokola i metrika rutiranja od velikog su teorijskog i praktičnog značaja za procenu performansi bežičnih komunikacionih sistema već duži niz godina. Protokoli rutiranja imaju važnu ulogu u pronalaženju optimalne putanje, konfiguraciji mreže, održavanju mreže i kreiranju mrežne topologije. Za određivanje optimalne putanje od izvora do odredišta protokoli rutiranja koriste različite metrike rutiranja.

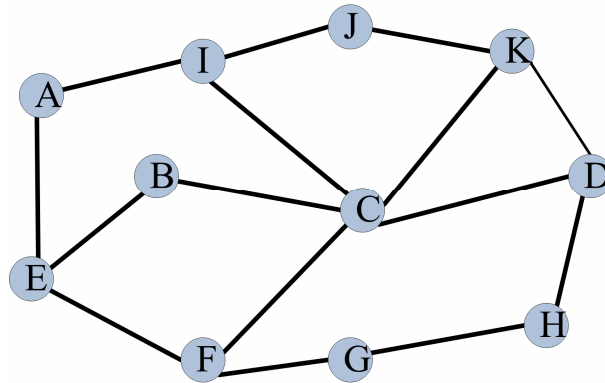
Metrika rutiranja predstavlja pravilo po kojem se od više formiranih putanja od izvorišta do odredišta podataka bira optimalna. Metrika se može definisati za putanju – metrika putanje ili za link – metrika linka. Metrika putanje predstavlja „težinu”, odnosno „cenu” jedne putanje od izvora do odredišta i zavisi od metrika linkova na toj putanji. Prilikom formiranja metrike rutiranja uzimaju se u obzir različiti parametri linka: verovatnoća gubitka paketa, interferencija, kašnjenje, potrošnja snage i sl.

U ovom radu predstavljen je kritički osvrt na metrike rutiranja u dostupnoj literaturi, kao njihovo poređenje u zavisnosti od kriterijuma koje treba da zadovolje.

Osnovni pojmovi

Radi lakšeg objašnjenja razlika između metrika rutiranja, neophodno je prvo uvesti osnovne pojmove i komponente od kojih se sastoji jedna *mesh* mreža. Iz tog razloga, na slici 1 prikazan je primer jedne jednostavne *mesh* mreže. Na slici 1 čvorovi mreže označeni su slovima A, B, C,..., K. Svaka dva čvora koja su u međusobnom dometu povezana su „linijom”,

odnosno linkom, na primer čvor A i čvor E povezani su linkom AE. Kod jednokanalnih mreža link između dva čvora postoji ako su u međusobnom dometu, dok je kod višekanalnih mreža neophodno da, osim da čvorovi budu u međusobnom dometu, rade i na istom kanalu.



Slika 1 – Primer mesh mreže
Figure 1 – Example of a mesh network
Рис. 1 – Пример ячеистой сети

Pod pojmom putanje između dva čvora podrazumeva se bilo koja putanja koja povezuje izvorišni čvor (koji inicira slanje paketa) i odredišni čvor (kojem izvorišni čvor želi da pošalje pakete). Na primer, ako bi čvor A, sa slike 1, bio izvorišni čvor koji želi da komunicira sa odredišnim čvorom D, između ova dva čvora moguće je naći više putanja, od kojih su neke: A-I-J-K-D, A-I-C-D, A-E-B-C-D, A-E-F-C-D ili A-E-F-G-H-D. Zadatak protokola rutiranja je da pronađe sve raspoložive putanje od izvorišnog do odredišnog čvora. S druge strane, metrika rutiranja svakoj putanji dodeljuje težinu (cenu) i ima zadatak da odredi koja je putanja optimalna, u zavisnosti od kriterijuma koji definišu metriku rutiranja. Neki od najvažnijih kriterijuma za kreiranje metrika navedeni su u sledećem poglavlju.

Kriterijumi za kreiranje metrika

Radi pronalaženja optimalne metrike, potrebno je definisati kriterijume o kojima treba voditi računa kada se ona formira. Ti kriterijumi mogu da pomognu prilikom odluke o tome koja je metrika optimalna za datu situaciju. Ipak, nijedna metrika ne može da bude bolja od ostalih po svim kriterijumima (Bahl, et al., 2004, pp.39-46). Efikasna metrika treba da sadrži neki parametar koji predstavlja meru kvaliteta linkova kako bi se pomoću nje izračunala optimalna putanja. Svaka metrika rutiranja ima svoje prednosti i nedostatke, koje zavise od kriterijuma za izbor optimalne pu-

tanje. Osim što služe određivanju optimalne putanje od izvora do odredišta, metrike treba da obezbede i stabilnost mreže.

Najznačajniji kriterijumi koje treba uzeti u obzir prilikom formiranja metrike rutiranja su:

- interferencija koja nastaje kao posledica deljenja medijuma za prenos. U zavisnosti od toga pod kojim uslovima se javlja, interferencija se deli u tri kategorije: interferencija unutar saobraćajnog toka (*intra-flow*), interferencija usled uticaja drugih tokova saobraćaja (*inter-flow*) i eksterna interferencija. *Intra-flow* interferencija javlja se kada više linkova na jednoj putanji (u okviru jednog toka saobraćaja), koji se nalaze u međusobnom dometu, radi na istom kanalu (Couto, et al., 2003, pp.134-146). S druge strane, *inter-flow* interferencija nastaje kada različiti saobraćajni tokovi, ostvareni među čvorovima koji su u međusobnom dometu, rade na istom kanalu, tj. nadmeću se za medijum. Imajući u vidu da na *inter-flow* interferenciju utiče više tokova saobraćaja, nju je mnogo teže predvideti i kontrolisati nego *intra-flow* interferenciju. Za razliku od prethodne dve interferencije, eksterna interferencija se javlja usled uticaja prenosa bežičnog signala koji radi na istoj učestanosti kao čvor koji detektuje eksternu interferenciju, ali koju stvaraju čvorovi iz neke druge spoljne mreže (Subramanian, et al, 2006, pp: 55-63);

- količina informacija, koja predstavlja meru koliko dodatnih informacija o linkovima (npr. verovatnoća uspešnog prenosa, nivo šuma, opterećenje linka i sl.) treba da prenose kontrolni paketi kako bi se na osnovu metrike odredila optimalna putanja. Ako bi kontrolni paketi prenosili prevelik broj informacija potrebnih metrikama za određivanje optimalne putanje, veličina kontrolnih paketa bila bi prevelika i došlo bi do zagušenja u mreži. S druge strane, ako se kontrolnim paketima prenosi mali broj informacija, posledica može biti da se na taj način biraju putanje koje ne daju optimalne performanse mreže. Zato je veoma važno proceniti koja je mera količine informacija optimalna za formiranje metrike rutiranja;

- opterećenje linka, koje predstavlja meru iskorišćenja mrežnih kapaciteta. Da bi se metrikom postiglo ravnomerno iskorišćenje svih linkova u mreži, neophodno je odrediti kapacitet svakog linka. Kapacitet linka može se odrediti slanjem probnih paketa (radi merenja brzine prenosa podataka) ili korišćenjem informacije o raspoloživom protoku (npr. tip korišćene modulacione tehnike) sa fizičkog sloja. Balansiranjem opterećenja u mreži ostvaruju se bolje performanse mreže. Kada bi se metrikom selektovala putanja koja se ostvaruje preko linkova sa najvećim kapacitetima, ali da se pritom ne proverava koliko su ti linkovi opterećeni, došlo bi do neravnomerne raspodele raspoloživih kapaciteta linkova i smanjenja performansi mreže. Umesto toga, metrika treba da koristi relevantne (*real-time*) informacije o zauzeću linkova, koje prikuplja od susednih čvorova i da na osnovu tih informacija donosi odluku koja je putanja optimalna;

– agilnost metrike, koja predstavlja njenu sposobnost da se brzo i efikasno prilagodi promenama u mrežnoj topologiji i promenama opterećenja mreže. Da bi neka metrika mogla da zadovolji uslove po pitanju agilnosti, brzina kojom se dobijaju i osvežavaju podaci, dobijeni merenjima, mora biti veća od brzine kojom se menja topologija ili opterećenje u mreži. Ako se promene u mreži dešavaju brže nego što se odvijaju merenja, metrika neće obezbediti pravu sliku o stanju u mreži, pa samim tim neće biti pouzdana;

– stabilnost metrike, koja direktno utiče i na stabilnost izabrane putanje, a samim tim i na ukupne performanse mreže. Izborom nestabilnih putanja utiče se na smanjenje performansi mreže, pa je neophodno da se metrika putanje što manje menja tokom vremena (Yang, et al., 2006, pp.3-5). Ako bi se vrednost metrike putanje često menjala, često bi se menjali i podaci o optimalnim putanjama, što bi uticalo na zagušenje mreže i smanjenje protoka;

– praćenje dinamike signala na svakom pojedinačnom linku. Imajući u vidu da na propagaciju signala bežičnim putem utiču različiti parametri, stanje svakog pojedinačnog linka menja se u toku vremena veoma brzo. Zbog toga je neophodno da metrika rutiranja prati te brze promene, kako bi se, u slučaju da kvalitet nekog od linkova na izabranoj putanji opadne u nekom trenutku, metrikom odabrala nova putanja koja se sastoji iz kvalitetnijih linkova.

Pregled metrika dostupnih u literaturi

Kako bi se metrikom rutiranja odredila optimalna putanja, izvorišnom čvoru koji „bira” putanju moraju biti na raspolaganju podaci o broju skokova, interferenciji, protoku i sl. U zavisnosti od kriterijuma koje uzimaju u obzir, metrike se mogu podeliti na dve grupe: metrika dužine putanje (*hop count*) i metrike koje uzimaju u obzir kvalitet linka (*link-quality*). U nastavku ovog poglavlja opisana je *hop count* metrika, i dat pregled najznačajnijih metrika koje uzimaju u obzir kvalitet linka.

Metrika dužine putanje (hop count)

Metrika dužine putanje (*hop count*) koristi se kod poznatih protokola rutiranja kao što su DSR (*Dynamic Source Routing*) (Johnson, 2007), AODV (*Ad hoc On demand Distance Vector*) (Parkins, et al., 2003) i DSDV (*Destination Sequenced Distance Vector*) (Parkins, Bhagwat, 2004, pp.234–244). Kod ove metrike optimalna putanja je ona sa najmanjim brojem skokova (najkraća putanja).

Hop count metrika je najjednostavnija. Veoma je stabilna, ne zahteva dodatne informacije o kvalitetu linka i omogućava efikasno pronalaženje putanje sa najmanjim brojem skokova. U mrežama čiji su čvorovi veoma mobilni, *hop count* metrika daje jednostavnije i brže rezultate, nego metrike koje zavise od

kvaliteta linka. Kada se koristi *hop count* metrika, kontrolni paketi koji određuju putanju su mali, jer metrika ne zahteva dodatne informacije o linkovima, pa se samim tim i brže prenose. Međutim, *hop count* metrika sve linkove u mreži posmatra na isti način, ne uzimajući u obzir njihovo opterećenje, kao ni interferenciju. Imajući u vidu da su čvorovi u bežičnim *mesh* mrežama uglavnom statični, *hop count* metrika ne daje optimalne rezultate kod ovih mreža.

ETX (Expected Transmission Count) metrika

ETX (*Expected Transmission Count*) (Couto, et al., 2003, pp.419–434) predstavlja jednu od najznačajnijih metrika rutiranja. ETX metrika je prva koja uvodi princip određivanja optimalne putanje na osnovu kvaliteta linka (*link-quality*). Ona bira putanju za koju je potreban najmanji broj prenosa za uspešno slanje paketa od izvorišnog do odredišnog čvora.

ETX metrika za link računa se korišćenjem *forward* i *reverse* verovatnoća uspešnog prenosa paketa podataka duž tog linka. *Forward* verovatnoća, p_f , predstavlja verovatnoću da paket podataka uspešno stigne od čvora X koji je inicirao slanje, do čvora Y kojem je paket poslat. Kada čvor Y uspešno primi paket, on odgovara ACK (*Acknowledgement*) paketom. *Reverse* verovatnoća, p_r , je verovatnoća da ispravan ACK paket stigne do čvora X. Čvor X smatra da je paket uspešno primljen samo ako dobije ACK, pa je verovatnoća uspešnog prenosa paketa $p_f \cdot p_r$.

Verovatnoće uspešnog prijema određuju se pomoću LPP (*Link Probe Packet*) paketa na način opisan u (Couto, et al., 2003, pp.419–434). Svaki čvor difuzno šalje LPP pakete, svakih τ sekundi (npr. svake sekunde) i broji koliko je LPP paketa primio u poslednjih μ sekundi (npr. 10 sekundi) od svakog njemu susednog čvora posebno.

Neka su X i Y dva susedna čvora, i $count_f(t-\mu, t)$ i $count_r(t-\mu, t)$ broj LPP paketa koje je Y primio od X i X primio od Y, respektivno, u intervalu $(t-\mu, t)$. Tada su *forward* i *reverse* verovatnoće uspešnog prijema paketa u trenutku t , date formulama (1) i (2):

$$p_f(t) = \frac{count_f(t-\mu, t)}{\mu / \tau} \quad (1)$$

$$p_r(t) = \frac{count_r(t-\mu, t)}{\mu / \tau} \quad (2)$$

ETX metrika za link XY, između čvorova X i Y je (Couto, et al., 2003, pp.419–434):

$$ETX_{XY} = \frac{1}{p_f \cdot p_r} \quad (3)$$

Metrika putanje p određena je zbirom ETX metrika svih linkova l koji je čine, (4). Optimalna putanja je putanja sa najmanjom metrikom.

$$ETX_p = \sum_{l \in p} ETX_l \quad (4)$$

ETX metrika favorizuje putanje koje čine linkovi sa većom verovatnoćom uspešnog prenosa paketa i manjom interferencijom, čak i ako te putanje imaju više skokova. To znači da ETX indirektno vodi računa o *inter-flow* interferenciji. Linkovi sa većom *inter-flow* interferencijom imaju veći broj izgubljenih paketa, pa samim tim i veće vrednosti ETX metrike. Primenom ETX metrike izbegavaće se prethodno pomenuti linkovi, kad god je to moguće. Međutim, u formuli za ETX metriku ne figuriše parametar koji zavisi od *inter-flow* interferencije, tj. ETX je ne meri direktno. Takođe, ne postoji parametar koji zavisi od karakteristika radio-kanala na kojem radi link, što znači da ETX metrika ne razlikuje kanale u mreži, tj. dizajnirana je za jednokanalne mreže i ne vodi računa o *intra-flow* interferenciji. ETX metrika ne uzima u obzir opterećenje linka.

LAETT (Load Aware Expected Transmission Time) metrika

LAETT (*Load Aware Expected Transmission Time*) (Aiache, et al., 2008, pp.629-634) metrika linka između čvorova X i Y, data formulom (5), meri očekivano vreme potrebno za prenos podataka, vodeći računa koliko je preostali kapacitet čvorova X i Y:

$$LAETT_{XY} = ETX_{XY} \cdot \frac{S}{\left(\frac{RX_X + RX_Y}{2\gamma_{XY}} \right)} \quad (5)$$

gde je ETT_{XY} (*Expected Transmission Time*) metrika data formulom (6), S prosečna veličina paketa, γ_{XY} faktor kvaliteta linka definisan tabelom 1 (rastojanje predstavlja udaljenost između čvorova Y i X), a RC (*Remaining Capacity*) raspoloživo opterećenje čvorova koje se računa po formuli (7).

$$ETT_{XY} = ETX_{XY} \cdot \frac{S}{B_{XY}} \quad (6)$$

gde je ETX_{XY} metrika data formulom (3), S prosečna veličina paketa, a B_{XY} maksimalni raspoloživi protok linka XY.

$$RC_X = B_X - \sum_{k=1}^{N_X} f_{XY_k} \cdot \gamma_{XY_k} \quad (7)$$

gde je N_X ukupan broj interfejsa čvora X, f_{XYk} je protok kroz k -ti link, koji se množi faktorom linka γ_{XYk} , a B_X je ukupan maksimalni protok koji može da se ostvari preko svih interfejsa čvora X.

Tabela 1 – Vrednosti faktora kvaliteta linka γ_{XY}
 Table 1 – Values for the link quality factor γ_{XY}
 Таблица 1 – Значения Q-фактора (добротности) γ_{XY}

Rastojanje (m)	>1600	>800	>560	>480	>400
Faktor linka γ_{XY}	∞	4	3	2	1

Metrika putanje p računa se kao suma svih metrika linkova l koji je čine (8):

$$LAETT_p = \sum_{l \in p} LAETT_l \quad (8)$$

LAETT metrikom računa se potrebno vreme za uspešan prenos paketa u zavisnosti od preostalog raspoloživog kapaciteta čvorova. Ako su čvorovi veoma opterećeni, imaće male RC vrednosti, pa će povećati ukupnu metriku linka. Na taj način vrši se raspodela opterećenja u mreži. Međutim, i LAETT metrika indirektno uračunava *inter-flow* interferenciju, dok se *intra-flow* interferencija ne uzima u obzir.

EETT (Exclusive Expected Transmission Time) metrika

EETT (*Exclusive Expected Transmission Time*) (Jiang, et al., 2007, pp.1550-1553) metrika rutiranja, osim vremena potrebnog za uspešan prenos paketa, uračunava i uticaj *intra-flow* interferencije. Neka se posmatra putanja p , od izvorišnog čvora S do odredišnog čvora D i neka je XY jedan od linkova na toj putanji. Ako je $IS(XY)$ broj uzastopnih linkova na putanji p koji interferiraju sa linkom XY (uključujući i sam link), i ako je ETT_{XY} dato formulom (6), EETT linka XY definiše se kao:

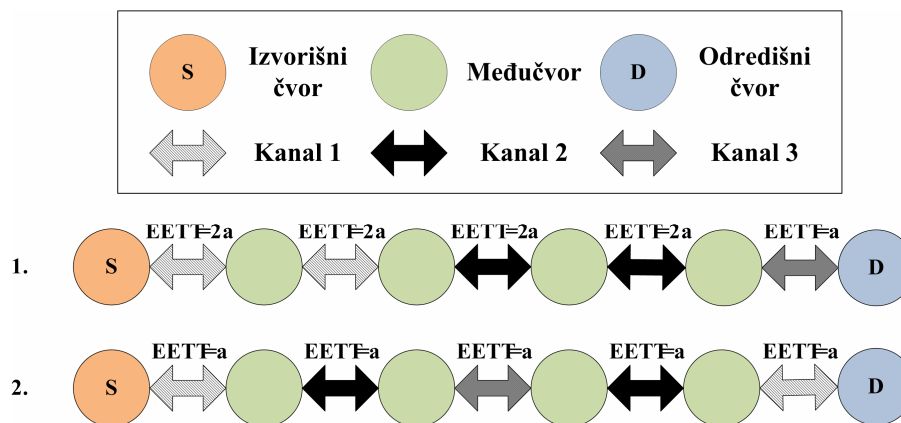
$$EETT_{XY} = \sum_{i \in IS(XY)} ETT_i \quad (9)$$

Metrika putanje p računa se kao suma svih metrika linkova l koji je čine:

$$EETT_p = \sum_{l \in p} EETT_l \quad (10)$$

Da bi se lakše objasnila metrika, dat je primer na slici 2, na kojoj su prikazane dve putanje od čvora S do čvora D. Neka je uvedena pretpo-

stavka da je ETT metrika za svaki link, kod obe putanje, ista i iznosi a . Osim toga, na slici je označeno na kom kanalu rade pojedini linkovi. Ako se posmatra prva putanja, prvi i drugi link na putanji rade na kanalu 1, a treći i četvrti na kanalu 2. Pošto linkovi međusobno interferiraju, smanjuje im se raspoloživi protok. Na osnovu izraza za EETT metriku, (9), metrike sva četiri linka su po $2a$ (slika 2). Kod druge putanje prvi i peti link rade na kanalu 1, a drugi i četvrti na kanalu 2. Međutim, nijedna dva susedna linka ne rade na istom kanalu, pa je *intra-flow* interferencija ove putanje manja. Svi linkovi na drugoj putanji imaju isto EETT koje iznosi a . Na osnovu formule za metriku putanje (10), za optimalnu putanju biće izabrana druga putanja, jer ima manju EETT ($5a$), u odnosu na prvu (koja ima EETT $9a$).



Slika 2 – Primer određivanja EETT metrike za različite putanje
 Figure 2 – Counting the EETT metric for different paths
 Рис. 2 – Подсчет EETT- метрик для различных путей

EETT metrika efikasno rešava problem *intra-flow* interferencije, dok *inter-flow* interferenciju računa indirektno kroz ETT metriku. EETT metrikom se ne uračunava opterećenje linka.

WCETT (Weighted Expected Transmission Time) metrika

WCETT (Weighted Cumulative Expected Transmission Time) (Draves, et al., 2004, pp.114-128) jeste prva metrika kod koje se metrika putanje ne računa prostim sabiranjem metrika linkova. Takođe, WCETT metrikom se, prilikom formiranja cene putanje, uzima u obzir upotreba odgovarajućeg kanala na svakom pojedinačnom linku, tj. WCETT metrika je formirana za rad sa višekanalnim mrežama.

Formulom (11) dat je izraz za WCETT metriku putanje p , koju čine linkovi l :

$$WCETT_p = (1 - \beta) \sum_{l \in p} ETT_l + \beta \max_{1 \leq c \leq k} X_p(c) \quad (11)$$

gde je ETT metrika data formulom (6), k broj kanala na kojima radi mreža, $X_p(c)$ metrika data formulom (12), a β je parametar koji uzima vrednost između 0 i 1.

Da bi se u metriku putanje p uračunao i uticaj *intra-flow* interferencije, za svaki kanal c , na putanji p , definiše se $X_p(c)$, kao:

$$X_p(c) = \sum_{i \in p} ETT_i, 1 \leq c \leq k \quad (12)$$

gde i predstavlja link na putanji p koji radi na kanalu c .

Prvi sabirak u formuli (11) predstavlja sumu ETT metrika linkova na putanji, i određuje koliko je ukupno kašnjenje prilikom prenosa paketa. Drugi sabirak zavisi od najveće sume $X_p(c)$, tj. od zbira ETT metrika linkova koji rade na najviše korišćenom kanalu putanje p . To znači da će putanja koja koristi više različitih kanala imati manju maksimalnu vrednost $X_p(c)$, a, suprotno tome, putanje koje imaju puno linkova koji rade na istom kanalu imaće veću maksimalnu vrednost $X_p(c)$. Podešavanjem parametra β reguliše se da li je važniji uticaj prvog ili drugog sabirka, tj. da li je bitnije da je manje kašnjenje od izvora do odredišta (prvi) ili da je manja *intra-flow* interferencija (drugi sabirak).

iAWARE (Interference Aware Routing) metrika

iAWARE (Interference Aware Routing) (Subramanian, et al., 2006, pp.55-63) metrika uračunava efekte promene verovatnoće gubitka paketa, *inter-flow* i *intra-flow* interferenciju. Ako je ETT za link XY dat formulom (6), *iAWARE* metrika linka XY računa se kao:

$$iAWARE_{XY} = \frac{ETT_{XY}}{IR_{XY}} \quad (13)$$

U formuli (13), $IR_{XY}(X)$ predstavlja odnos $SINR_{XY}(X)$ (signal/(šum + interferencija)) i $SNR_{XY}(X)$ (signal/šum) linka XY , na strani čvora X . Ako nema interferencije, $SINR$ i SNR će biti isti, pa će IR biti 1.

$$IR_{XY} = \frac{SINR_{XY}(X)}{SNR_{XY}(X)} \quad (14)$$

ako se uzme u obzir bidirekcionalnost linka, IR_{XY} za link XY definiše se kao:

$$IR_{XY} = \min(IR_{XY}(X), IR_{XY}(Y)) \quad (15)$$

Konačno, iAWARE metrika putanje p računa se kao:

$$iAWARE_p = (1 - \beta) \cdot \sum_{l \in p} iAWARE_l + \beta \max_{1 \leq c \leq k} Y_p(c) \quad (16)$$

gde je $Y_p(c)$ dato formulom (17), a β je parametar kojim se reguliše da li je bitnije kašnjenje u prenosu (prvi sabirak) ili *intra-flow* interferencija (drugi sabirak).

Da bi se u metriku putanje uračunao i uticaj *intra-flow* interferencije, za svaki kanal c , na putanji p , definiše se $Y_p(c)$, kao:

$$Y_p(c) = \sum_{i \in p} iAWARE_i, \quad 1 \leq c \leq k \quad (17)$$

gde su i linkovi na putanji p koji rade na kanalu c , a k broj raspoloživih kanala u mreži.

iAWARE metrika računa efekte promena gubitaka na linku, razlike u brzini prenosa i *intra-flow* i *inter-flow* interferenciju. Kada link ima veću vrednost IR nego ETT , iAWARE metrika će biti manja, biće favorizovan link koji ima manje ETT , ali veću interferenciju. iAWARE metrikom se ne vodi računa o opterećenju linka.

MIC (Metric of Interference and Channel-switching) metrika

MIC (*Metric of Interference and Channel-switching*) (Yang, et al., 2006, pp.3-5) sastoji se od dve metrike IRU (*Interference aware Resource Usage*) koja u metriku putanje unosi uticaj *inter-flow* interferencije i CSC (*Channel Switching Cost*) koja unosi uticaj *intra-flow* interferencije.

IRU metrika linka između čvorova X i Y , koji radi na kanalu c , definišana je kao:

$$IRU_{XY}(c) = ETT_{XY}(c) \cdot N_{XY}(c) \quad (18)$$

gde je $ETT_{XY}(c)$ metrika data formulom (6), a $N_{XY}(c)$ ukupan broj čvorova koji stvaraju interferenciju linku XY na kanalu c . $N_{XY}(c)$ se računa kao:

$$N_{XY}(c) = |N_X(c) \cup N_Y(c)| \quad (19)$$

gde su $N_X(c)$ i $N_Y(c)$ broj suseda čvorova X i Y , respektivno, koji sa njima interferiraju tokom emitovanja na kanalu c .

CSC komponenta metrike za čvor X računa se na sledeći način:

$$CSC_X = \begin{cases} \omega_1, & CH(prev(X)) \neq CH(X) \\ \omega_2, & CH(prev(X)) = CH(X) \end{cases} \quad 0 \leq \omega_1 < \omega_2 \quad (20)$$

gde je $prev(X)$ prethodni čvor čvora X na putanji koja se posmatra, a $CH(X)$ kanal koji čvor X koristi za prenos podataka do sledećeg čvora na putanji. Veza $\omega_1 < \omega_2$ omogućava da, kada čvor X emituje podatke na istom kanalu po kojem su mu podaci i stigli od prethodnog čvora, $prev(X)$, CSC metrika bude veća nego kada susedni čvorovi na putanji koriste različite kanale. Na taj način, putanja sa manjom *intra-flow* interferencijom imaće manju vrednost CSC.

Kombinacijom IRU i CSC definiše se MIC metrika putanje p kao:

$$MIC_p = \frac{1}{N_n \cdot ETT_{\min}} \cdot \sum_{l \in p} IRU_l + \sum_{X \in p} CSC_X \quad (21)$$

gde je N_n broj čvorova u mreži, ETT_{\min} najmanji ETT na putanji, l predstavlja linkove putanje p , a X čvorove na putanji p .

MIC metrika podržava korišćenje više radio-kanala na putanji, i, kroz CSC komponentu, uključuje uticaj *intra-flow* interferencije u metriku putanje. Kroz IRU komponentu, u metriku putanje uključena je *inter-flow* interferencija. Međutim, MIC metrika podrazumeva da svi linkovi imaju isti nivo interferencije, nezavisno da li u nekom trenutku postoji prenos preko tog interferirajućeg linka ili ne. Pored toga, CSC računa *intra-flow* interferenciju samo kod susednih linkova.

PowerETX (power Expected Transmission Count) metrika

Kada se računa ETX metrika za neki link, za njega se određuje verovatnoća uspešnog prenosa paketa tokom određenog perioda. Međutim, kako protok na pojedinačnim linkovima zavisi od trenutnog saobraćajnog opterećenja u kompletnoj mreži, verovatnoća uspešnog prenosa paketa može znatno da osciluje tokom vremena. Može se desiti da usled različitih uticaja na stanje linka (npr. gubitak LoS uslova između predajnika i prijemnika, promena položaja prepreka, i sl.) jedan isti link u jednom trenutku ima malu, a u nekom drugom trenutku veliku verovatnoću gubitka paketa. Do ove pojave dolazi usled brzih promena u kvalitetu linka tokom vremena, koje su posebno izražene u zatvorenom prostoru, gde veliki uticaj na propagaciju signala ima sama struktura objekta kroz koji se signal prostire između bežičnih čvorova u mreži.

Radi praćenja brzih promena koje se dešavaju na svakom linku u mreži, definisana je *powerETX* metrika za link *XY*, između čvorova *X* i *Y*, data formulom (22) (Malnar, et al., 2014, pp.41-51).

$$powerETX_{XY} = a_{XY} \cdot ETX_{XY} \quad (22)$$

gde je a_{XY} koeficijent, definisan tabelom 2, za link *XY*, a *ETX* metrika tog linka data formulom (3).

Tabela 2 – Vrednosti koeficijenata u zavisnosti od nivoa snage na ulazu u prijemnik (Malnar, et al., 2014, pp.41-51).

Table 2 – Coefficient values depending on the received signal power

Таблица 2 - Значения коэффициентов в зависимости от уровня мощности на входе

Interval [dBm]	Koeficijent a_i	Interval [dBm]	Koeficijent a_i
[- 81, -75)	a_7	[- 60, -55)	a_3
[- 75, -70)	a_6	[- 55, -50)	a_2
[- 70, -65)	a_5	[- 50, -45)	a_1
[- 65, -60)	a_4	$\geq - 45$	a_0

Kao što se može primetiti iz tabele 2, koeficijenti a_i su klasifikovani u osam kategorija, u zavisnosti od nivoa snage signala na linku za koji se određuje *powerETX* metrika. Minimalna snaga za koju je vršena klasifikacija iznosi -81dBm, što odgovara karakteristikama opreme koja je korišćena za merenje. Između koeficijenata a_i definisana je sledeća relacija (Malnar, et al., 2014, pp.41-51):

$$a_0 < a_1 < \dots < a_7 \quad (23)$$

Na osnovu relacije (23), linkovima kod kojih je snaga signala na prijemu manja dodeljuje se veći koeficijent, a linkovima na kojima je snaga signala na prijemu veća dodeljuje se manji koeficijent. U radu (Malnar, et al., 2014, pp.41-51) pokazano je da odabir vrednosti koeficijenta ne utiče znatno na performanse mreže, već je bitno da se zadrži međusobni odnos koeficijenata definisan izrazom (23), kako bi se u metrici favorizovali linkovi sa većim nivoom snage signala na prijemu. Ako se posmatraju dva linka sa istim *ETX*, bolji link biće onaj koji u tom trenutku ima veći nivo snage signala na prijemu, i na taj način se vodi računa o trenutnom stanju svakog linka.

Za koeficijente a_i uzete su vrednosti: $a_0=0,4$, $a_1=0,5$, ..., $a_7=1,1$ (Malnar, et al., 2014, pp.41-51). Podela je izvršena za vrednosti u opsegu od -81 dBm do -45 dBm (što odgovara parametrima korišćene opreme u mreži u kojoj su sprovedena merenja). Poređenjem rezultata simulacija sprovedenih za različite širine intervala (nivoa snage na ulazu u prijemnik) kojima se dodeljuje jedna vrednost koeficijenta a_i , autori u (Malnar, et al., 2014, pp.41-51) došli su do zaključka da je optimalna širina intervala 5 dB.

Konačno, $powerETX$ metrika putanje p , koja se sastoji od linkova l , određena je formulom (24). Optimalna putanja je putanja koja ima najmanju metriku.

$$powerETX_p = \sum_{l \in p} powerETX_l \quad (24)$$

PowerWCETT (power Weighted Expected Transmission Time) i powerMIC (power Metric of Interference and Channel-switching) metrike

Princip zasnovan na $powerETX$ metrici primenjen je i na metrike WCETT i MIC. Na taj način formirane su $powerWCETT$ i $powerMIC$ metrike (date formulama (25) i (27), respektivno) (Malnar, et al., 2014, pp.41-51).

$$powerWCETT_p = (1 - \beta) \sum_{l \in p} powerETT_l + \beta \max_{1 \leq c \leq k} X_p(c) \quad (25)$$

gde je β parametar koji uzima vrednosti između 0 i 1, k broj kanala na kojima radi mreža, $X_p(c)$ definisano formulom (12), dok se $powerETT$ metrika za link XY računa na osnovu $powerETX$ metrike za link XY i formule (6), na sledeći način:

$$powerETT_{XY} = powerETX_{XY} \cdot \frac{S}{B_{XY}} \quad (26)$$

gde je S prosečna veličina paketa, a B_{XY} maksimalni raspoloživi protok linka XY .

$PowerMIC$ metrika definisana je formulom:

$$MIC_p = \frac{1}{N_n \cdot powerETT_{\min}} \cdot \sum_{l \in p} powerIRU_l + \sum_{X \in p} CSC_X \quad (27)$$

pri čemu je N_n broj čvorova u mreži, $powerETT_{\min}$ najmanji $powerETT$ na putanji p , CSC metrika definisana formulom (20), dok se $powerIRU$ računa na sledeći način:

$$powerIRU_{XY}(c) = powerETT_{XY}(c) \cdot N_{XY}(c) \quad (28)$$

gde je $powerETT$ metrika za link XY definisana formulom (26), a $N_{XY}(c)$ dato formulom (19).

Usporedna analiza opisanih metrika

U tabeli 3 dat je pregled metrika po osnovnim kriterijumima koji su opisani i definisani na početku rada: interferencija, opterećenje čvorova, agilnost, stabilnost i sposobnost da prati brze promene na svakom pojedinačnom linku. Na osnovu tabele može se zaključiti da svaka metrika ima ograničenja po nekom kriterijumu.

Metrika dužine putanje (*hop count*) ne uzima u obzir parametre kao što su interferencija i kvalitet linka, ali je jednostavna, ne zahteva dodatne informacije i ima visok stepen agilnosti.

ETX metrika je prva metrika koja u izbor optimalne putanje unosi parametar koji opisuje kvalitet linka (*link-quality*). Bira putanje sa većom verovatnoćom uspešnog prenosa paketa i ne vodi računa o kapacitetu linka. S obzirom na to da određivanje ETX metrike zahteva periodično slanje dodatnih LPP paketa, ETX (i sve njene modifikacije) nema dobru agilnost. ETX ne vodi računa o opterećenju linka, indirektno vodi računa o *inter-flow* i ne vodi se računa o *intra-flow* interferenciji.

LAETT metrika uvodi balansiranost opterećenja u mreži, vodi računa o opterećenju i kvalitetu linka. Kao i ETX, samo indirektno uračunava *inter-flow* interferenciju, dok ne uključuje *intra-flow* interferenciju. Zbog slanja probnih paketa ima mali stepen agilnosti.

EETT metrika računa *intra-flow* interferenciju, a indirektno računa i *inter-flow* interferenciju.

WCETT računa uticaj *intra-flow* interferencije; biraju se putanje na kojima se ređe koriste isti kanali. Kao i prethodne metrike, WCETT samo indirektno meri *inter-flow* interferenciju, nije agilna i ne vodi računa o opterećenju linkova.

iAWARE metrikom proverava se da li ima generisanog saobraćaja, jer se susedni čvorovi samo tada međusobno ometaju. Računa *intra-flow* i *inter-flow* interferenciju i direktno meri interferenciju od susednih čvorova.

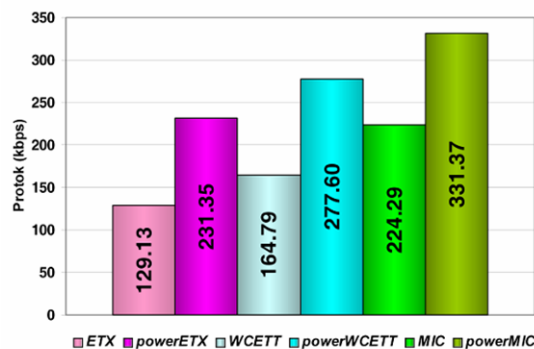
MIC metrika pokušava da prevaziđe ograničenja WCETT metrike direktnim računanjem *intra-flow* i *inter-flow* interferencije, ali se *intra-flow* interferencija računa samo između susednih linkova. Ne vodi računa o opterećenju linkova i nema sposobnost agilnosti.

Zanimljivo je da navedene metrike ne mogu da isprate veliku dinamiku promena stanja svakog pojedinačnog linka, koja je karakteristična za bežične *mesh* mreže, posebno kada se realizuju unutar objekata. Zbog toga su autori, u svojoj prethodnoj publikaciji (Malnar, et al., 2014, pp.41-51), predložili tri metrike: *powerETX*, *powerWCETT* i *powerMIC*, koje nadoknađuju ovu manu prethodnih metrika.

Tabela 3 – Poređenje metrika
 Table 3 – Metrics comparison
 Таблица 3 – Систематизированные метрики

	Inter-flow	Intra-flow	Opterećenje	Agil-nost	Stabil-nost	Dina-mika
Hop count	Ne	Ne	Ne	Da	Da	Ne
ETX	Ne	Da	Ne	Ne	Ne	Ne
LAETT	Ne	Da	Da	Ne	Ne	Ne
EETT	Da	Da	Ne	Ne	Ne	Ne
WCETT	Da	Da	Ne	Ne	Ne	Ne
iAWARE	Da	Da	Ne	Ne	Ne	Ne
MIC	Da	Da	Ne	Ne	Ne	Ne
powerETX	Ne	Da	Ne	Ne	Ne	Da
powerWCETT	Da	Da	Ne	Ne	Ne	Da
powerMIC	Da	Da	Ne	Ne	Ne	Da

Na slici 3 prikazana je uporedna analiza šest metrika u zavisnosti od protoka korisničkih podataka, dok je na slici 4 data uporedna analiza po ostvarenom srednjem kašnjenju s kraja na kraj.



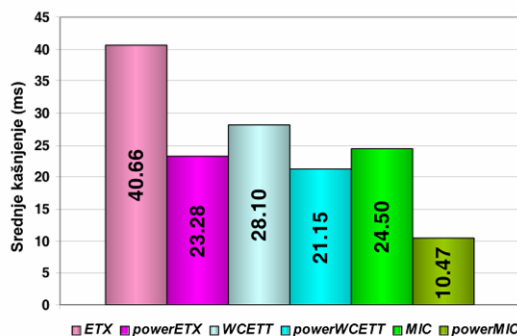
Slika 3 – Uporedna analiza metrika po ostvarenom protoku korisničkih podataka (Malnar, et al., 2014, pp.41-51)

Figure 3 – Comparative analysis of the metrics by the throughput of user data
 Рис. 3 – Системный анализ реализованного пользовательского трафика

Rezultati su dobijeni simulacijom mreže koja se sastoji od 12 statičnih čvorova, raspoređenih na prostoru dimenzija 141,7 m × 66,1 m, tako da ostvaruju optimalno radio- pokrivanje u zatvorenom prostoru. Simulirano okruženje odgovara prizemlju zgrade Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Detaljan opis okruženja, kao i parametara propagacionog modela korišćenog za simulacije može se naći u (Malnar, et al., 2014, pp.41-51).

U radu (Malnar, et al., 2014, pp.41-51) pokazano je da se powerETX metrikom ostvaruje 78% bolji protok (slika 3) i 42,5% manje kašnjenje s kraja na kraj (slika 4) nego primenom ETX metrike. Na taj način, powerETX metrika, kao i ETX metrika, nema dobru agilnost, indirektno vodi ra-

čuna o *inter-flow* interferenciji, ne vodi računa o *intra-flow* interferenciji, ali za razliku od ETX metrike prati brze promene u stanju svakog pojedinačnog linka na trasi.



Slika 4 – Usporedna analiza metrika po ostvarenom srednjem kašnjenju s kraja na kraj (Malnar, et al., 2014, pp.41-51)

Figure 4 – Comparative analysis of the metrics by the average end to end delay
Рис. 4 – Системный анализ метрик по среднему запаздыванию „end to end“

Kao i WCETT metrika, i *powerWCETT* metrika računa uticaj *intra-flow* interferencije, indirektno meri *inter-flow* interferenciju, nije agilna i ne vodi računa o opterećenju linkova. Međutim, *powerWCETT* metrikom prati se dinamika promene stanja svakog linka, te i ona pokazuje poboljšanje po pitanju protoka (68%) i po pitanju kašnjenja (24,7%) u odnosu na WCETT metriku (Malnar, et al., 2014, pp.41-51) (slike 3 i 4).

Konačno, *powerMIC* metrika uključuje *intra-flow* i *inter-flow* interferencije, ali, kao i MIC, *intra-flow* interferenciju računa samo između susjednih linkova. Ne vodi računa o opterećenju linkova, nema sposobnost agilnosti, ali vodi računa o dinamici promene stanja linkova. *PowerMIC* metrikom ostvaruje se 47% veći protok (slika 3) i 57,2% manje kašnjenje (slika 4), nego korišćenjem MIC metrike (Malnar, et al., 2014, pp.41-51).

Na osnovu analiza sprovedenih u radu (Malnar, et al., 2014, pp.41-51) po pitanju protoka *powerMIC* metrika pokazala je 19% bolje rezultate nego *powerWCETT*, a *powerWCETT* 20% bolje nego *powerETX* (slika 3). Dok je po pitanju kašnjenja *powerWCETT* metrika dala 9,1% manje kašnjenje nego *powerETX*, *powerMIC* metrika pokazuje 50,5% manje kašnjenje nego kada se primenjuje *powerWCETT* (slika 4). Na osnovu pretходnog, može se zaključiti da je *powerMIC* metrika dala najbolje rezultate i po pitanju protoka i po pitanju kašnjenja s kraja na kraj.

Kako je naglašeno (Malnar, et al., 2014, pp.41-51) unapređene su ETX, WCETT i MIC, jer su to najčešće korišćene metrike, dok je modifikacija primenjena na njima moguća i za bilo koju drugu metriku koja u sebi sadrži ETX metriku.

Zaključak

Imajući u vidu sve veće potrebe korisnika za brzim i efikasnim prenosom podataka, neophodno je povećanje protoka u bežičnim mrežama, što se ostvaruje uvođenjem višekanalnih višeinterfejsnih WMN. Kako bi se ostvarile što bolje mrežne performanse neophodno je definisati protokole i metrike rutiranja kojima se određuje optimalna putanja između izvorišnog i odredišnog čvora. Imajući u vidu da kvalitet bežičnog linka predstavlja jednu od najvažnijih karakteristika bežičnih mreža, metrike koje opisuju kvalitet linka imaju veoma važnu ulogu u dizajniranju optimalnog protokola rutiranja u bežičnim mrežama. Svakom linku potrebno je dodeliti odgovarajuću metriku, kako bi protokol rutiranja dobro funkcionisao.

Osim toga, bežične *mesh* mreže, kao i sve bežične mreže, karakteriše velika dinamika signala na ulazu u prijemnik, posebno kada se realizuju unutar objekata. Kod većine metrika rutiranja obično se o toj očekivanoj, velikoj dinamici signala ne vodi računa. Ovakav pristup može imati za posledicu da sprovedena analiza ne daje realnu sliku performansi mreže.

U ovom radu predstavljeni su klasifikacija i kritički pregled metrika rutiranja koje se najčešće razmatraju u literaturi i čije se ideje najčešće koriste za realizaciju novih metrika rutiranja, dat je njihov opis i, konačno, izvršena je njihova uporedna analiza.

Literatura

Aiache, H., Lebrun, L., Conan, V., & Rousseau, S. 2008. A load dependent metric for balancing Internet traffic in Wireless Mesh Networks, Mobile Ad Hoc and Sensor Systems. U: IEEE Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems, Atlanta., str.629-634

Bahl, P., Adya, A., Padhye, J., & Walman, A. 2004. Reconsidering wireless systems with multiple radios. *SIGCOMM Comput. Commun. Review*, 34(5), str.39-46. doi:10.1145/1039111.1039122

De Couto, S., Aguayo, D., Bicket, J., & Morris, R. 2003. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. *Wireless Networks*, 11(4), str.419-434. doi:10.1145/1039111.1039122

Draves, R., Padhye, J., & Zill, B. 2004. Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks. U: ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, Philadelphia., str.114-128

Jiang, W., Liu, S., Zhu, Y., & Zhang, Z. 2007. Optimizing Routing Metrics for Large-Scale Multi-Radio Mesh Networks. U: International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Shanghai., str.1550-1553

Johnson, D. 2007. *The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4*. RFC 4728. Microsoft Research.

Malnar, M., Nešković, N., & Nešković, A. 2014. Novel power-based routing metrics for multi-channel multi-interface wireless mesh networks. *Wireless Networks*, 20(1), str.41-51. doi:10.1007/s11276-013-0587-8

Parkins, C., Belding-Royer, E., & Das, S. 2003. *Ad Hoc On demand Distance Vector (AODV) routing*, IETF Experimental RFC 3561.

Parkins, C., & Bhagwat, P. 2004. Highly dynamic Destination Sequenced Distance Vector Routing (DSDV) for mobile computers. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications review*, 24(4), str.234-244. doi:10.1145/190809.190336

Subramanian, A., Buddhikot, M., & Miller, S. 2006. Interference Aware Routing in Multi-Radio Wireless Mesh Networks. U: IEEE International Workshop on Wireless Mesh Networks, Reston., str.55-63

Yang, Y., Wang, J., & Kravets, R. 2006. Load-balanced routing for mesh networks. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 10(4), str.3-5. doi:10.1145/1215976.1215979

ОБЗОР ПОКАЗАТЕЛЕЙ МАРШРУТИЗАЦИИ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ МУЛЬТИ-ИНТЕРФЕЙСНЫХ ЯЧЕИСТЫХ СЕТЕЙ

ОБЛАСТЬ: телекоммуникации

ТИП СТАТЬИ: оригинальная научная статья

ЯЗЫК СТАТЬИ: сербский

Резюме:

Беспроводные ячеистые сети - WMNs (Wireless Mesh Networks) являются новой тенденцией в области беспроводной связи, которые предоставляют большую гибкость, надежность и лучшую производительность, чем стандартные беспроводные локальные сети. Учитывая растущий спрос на быстрый и эффективный способ передачи данных, увеличение трафика осуществлено путем введения многоканальных мульти-интерфейсных ячеистых сетей – MСMI (Multi-Channel Multi-Interface) WMNs. Для того, чтобы достичь максимально возможной производительности сети необходимо определить протоколы маршрутизации и метрик, которые определяют оптимальный путь между источником и узлом назначения. Учитывая, что WMN характеризуется высокой динамикой сигнала, особенно при реализации в сложных условиях (например в закрытых помещениях), необходимо определить показатели маршрутизации, которые не могут справиться с быстрыми изменениями условий распространения, которые происходят на каждой линии в сети. Эта статья представляет собой критический обзор наиболее известных метрик MСMI маршрутизации для беспроводных ячеистых сетей. Таковы основные критерии формирования маршрутизации по таким показателям, как помехи, объем информации, загруженность линии, маневренность, стабильность и способность отслеживать быстрые изменения в каждом узле. Описаны новые тенденции в развитии показателей маршрутизации для беспроводных ячеистых сетей, а также сравнения метрик, описанных в соответствии с вышеупомянутыми критериями. В заключении автор представляет итоговые замечания.

Ключевые слова: канал, протокол маршрутизации, беспроводная ячеистая сеть, маршрутизация, метрика, интерференция

SURVEY OF ROUTING METRICS FOR MULTI CHANNEL MULTI INTERFACE WIRELESS MESH NETWORKS

FIELD: Telecommunications
ARTICLE TYPE: Original scientific paper
ARTICLE LANGUAGE: Serbian

Summary:

WMNs (Wireless Mesh Networks) represent a new trend in wireless communications, providing greater flexibility, reliability and better network performances than standard WLANs (Wireless Local Area Networks). Having in mind a need for more efficient and faster data transmission, one of the greatest challenges in designing WMNs is to provide greater throughput. This is done by introducing networks the nodes of which have multiple interfaces that can work on one of multiple channels (the channel is chosen by a predefined algorithm), so-called Multi-Channel Multi-Interface (MCMi) WMNs. In order to provide better network performances, it is necessary to define routing protocols and metrics used to find and select the optimal route from the source to the destination node. Since WMNs are characterised by a high dynamic range of the received signal level, especially when they are realized in complex environments such as indoors, it is necessary to define routing metrics that can follow these fast changes in propagation conditions that occur in each link in the network.

This paper presents a critical review of the most well-known routing metrics for MCMi-WMNs. The paper is organised as follows:

Introduction

In this section, it is pointed that the need for wireless communications is growing in the modern society. Since wireless networks are widely used, the overall wireless communication is greatly increased. In order to provide greater throughput of user data, it is very important to select the optimal route between the source and the destination node. Therefore, a great attention is dedicated to creating an optimal routing protocol and routing metrics. Routing protocols have an important role in finding paths from the source to the destination nodes, and the routing metrics have the task to select the optimal route from multiple routes.

Criteria for creating metrics

In order to find the optimal metric, it is necessary to define criteria to be taken into account when the metric is formed. These criteria are: interference (intra-flow, inter-flow and external), the amount of information, link load, agility, stability and ability to track rapid changes at every link in the network. In this section, each of the criteria is defined and it is explained what a metric should have in order to satisfy the defined criteria.

Overview of the metrics available in the literature

In this section, the metrics available in the literature are described. Based on the criteria taken into account, metrics are divided into two categories: hop count metric and link-quality metrics. Link-quality metrics described in this paper are: ETX (Expected Transmission Count), LAETT (Load Aware Expected Transmission Time), EETT (Exclusive Expected Transmission Time), WCETT (Weighted Cumulative Expected Transmission Time), iAWARE (Interference Aware Routing), MIC (Metric of Interference and Channel-switching), powerETX, powerWCETT, and powerMIC. The rest of this section is organised into the following sub-sections:

Hop count metric

*ETX (Expected Transmission Count) metric
LAETT (Load Aware Expected Transmission Time) metric
EETT (Exclusive Expected Transmission Time) metric
WCETT (Weighted Cumulative Expected Transmission Time) metric
iAWARE (Interference Aware Routing) metric
MIC (Metric of Interference and Channel-switching) metric
powerETX (power Expected Transmission Count) metric
powerWCETT (power Weighted Cumulative Expected Transmission Time), and powerMIC (power Metric of Interference and Channel-switching) metrics*

In each of the sub-sections, a detailed description of a particular metric is given as well as its basic characteristics. The metric forming formulas are given as well.

Comparative analysis of the described metrics

In this section, the comparative analysis of the previously described metrics is given. Besides, the comparative analysis in the terms of throughput of user data and average end to end delay is provided, based on the results given in the literature. The analysis is performed on six metrics: ETX, WCETT, MIC, powerETX, powerWCETT and powerMIC. The first three metrics are chosen since they are most frequently used in the literature, and the other three metrics are formed based on the first three by introducing a parameter that follows fast changes in the state of each link independently.

Conclusion

In the final section, the concluding remarks are given. This section represents an overview of the entire paper, as well as the reasons why this subject was chosen as a topic of this paper.

Key words: channel; Routing protocols; Wireless mesh networks; routing; Metrics; interference.

Datum prijema članka / Paper received on / Дата получения работы: 26. 12. 2014.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa / Manuscript corrections submitted on / Дата получения исправленной версии работы: 13. 02. 2015.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje / Paper accepted for publishing on / Дата окончательного согласования работы: 15. 02. 2015.