

Pregled metoda rutiranja u Wireless mesh mrežama

Marija Malnar

Sadržaj — Sloj rutiranja jedan je od glavnih slojeva za komunikacione protokole kojima se postiže efikasno iskorišćenje resursa u *wireless mesh* mrežama (WMN).

U WMN osnovni cilj je što efikasniji i kvalitetniji prenos podataka od jednog do drugog korisnika. Pod kvalitetnim prenosom podrazumeva se malo kašnjenje, veliki protok, mala verovatnoća gubitka paketa i sl. Za postizanje takvog prenosa, potrebno je optimizovati različite parametre koji utiču na prenos podataka. Tema ovog rada je pregled metoda rutiranja, i kako pronaći optimalni metod. Porede se WMN sa jednim i više radio kanala po čvoru, metode dodele kanala u višekanalnim WMN (*Multi Radio Wireless Mesh*) i njihove karakteristike, mane i prednosti. Daje se pregled algoritama rutiranja primenom različitih metrika i porede njihove karakteristike.

Ključne reči — Dodela kanala, metrika, rutiranje.

I. UVOD

Algoritam rutiranja u WMN treba da uzme u obzir distribuirano upravljanje, da bude nezavistan od saobraćajnog profila, kao i da prati brze promena kvaliteta linka i vodi računa o smanjenju troškova [1].

Kod višekanalnih WMN, prilikom odabira sledećeg čvora, ka kome se usmeravaju paketi, uzima se u obzir i preko kog kanala se ostvaruje komunikacija. Može se dogoditi da odabrani kanal koriste još neki susedni čvorovi, pa dolazi do kašnjenja paketa i smanjenja brzine prenosa [1]. Strategija rutiranja treba da uzme u obzir i opterećenje raspoloživih bežičnih kanala, radi povećanja protoka i smanjenja interferencije. U okviru rada dat je pregled više strategija rutiranja, i protokola za višekanalne WMN. U drugom poglavlju istaknute su prednosti višekanalnih WMN i opisan problem dodele kanala. U trećem poglavlju opisane su i upoređene različite metrike.

II. VIŠEKANALNE WMN

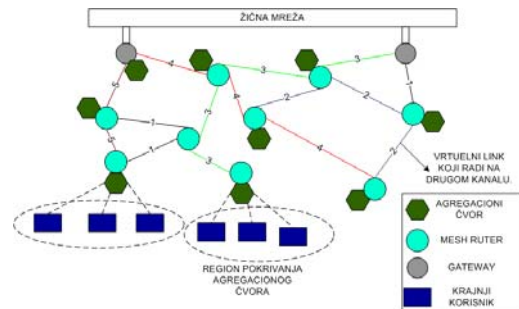
Tehnologije za fizički sloj današnjih WLAN sistema značajno su poboljšane, ali je njihov raspoloživi propusni opseg i dalje daleko manji nego kod odgovarajućih žičnih sistema. Kada se, osim prenosa podataka, uračuna i prenos sadržaja MAC sloja, zaglavlja paketa, paketske greške, ACK, korisni protok sistema je gotovo prepolovljen. Pored toga, kvalitet podataka na sloju linka rapidno opada sa porastom rastojanja između predajnika i prijemnika. Usled interferencije ovaj problem je još veći u *ad hoc* i *mesh* mrežama zbog mešanja putanja susednih čvorova.

Marija Malnar, Saobraćajni fakultet u Beogradu, Srbija (telefon: 381-64-2841600; e-mail: malnarm@verat.net)

IEEE standardi za ove mreže omogućuju 3 (za *ad hoc*), odnosno 12 (za *mesh*) frekvencijskih kanala koji se ne preklapaju, pa se problem interferencije može malo ublažiti. *Cross channel* komunikacija zahteva ili komutaciju kanala (*channel switching*) ili korišćenje više NIC (*Network Interface Cards*) kartica na svakom čvoru, podešenih tako da rade na različitim kanalima [2].

A. Dodela kanala u odnosu na opterećenost mreže

Arhitektura višekanalne WMN sastavljene iz nekoliko vrsta čvorova, prikazana je na Sl.1. [2]. Neki čvorovi su agregacioni sa stalnim saobraćajem, koji omogućuju povezanost krajnjih korisnika, neki su obični *mesh* ruteri, a neki *gateway* čvorovi ka žičnoj mreži. Svaki čvor opremljen je NIC karticama koje su kompatibilne sa IEEE 802.11 standardom. Čvorovi koji su na istom kanalu, a u međusobnom su dometu, stvaraju međusobne smetnje.



Sl.1. Arhitektura WMN

Raspoloživi kapacitet svakog virtuelnog linka treba da bude srazmeran očekivanom opterećenju na tom linku. Treba razrešiti problem kako raspodeliti kanale po susednim čvorovima (opisuju se veze preko kojih treba da komuniciraju susedni čvorovi) i kako odabrati kanale za koji čvor (odluka koji čvor treba da koristi koji kanal).

Algoritmom rutiranja određuje se putanja kroz mrežu od izvornog do odredišnog čvora. Rezultujuće putanje pamte se u tabele rutiranja za svaki čvor. Rutiranje ima važnu ulogu i u raspodeli opterećenja u mreži. Raspodelom opterećenja izbegava se preopterećenje nekih linkova, i omogućava efikasnija iskorišćenost mreže [2].

Osnovni cilj projektovanja mreže je da se maksimizira dobitak mreže. Mreži se omogućava da podrži veće protoke krajnjih korisnika i veći broj korisnika. Neka je $C(s,d)$, koristan kapacitet mreže, ostvaren između čvorova s i d [2]. Definiše se *cross-section* funkcija dobitka mreže:

$$X = \sum_{s,d} C(s,d)$$

Potrebno je definisati inicijalne vrednosti očekivanog

opterećenja svakog linka. Nakon inicijalizacije, vrši se dodela kanala, i pronalaze putanje između čvorova, sve dok propusni opseg svakog virtuelnog linka ne bude što je moguće približniji očekivanom opterećenju. Konačno, dobijeni kapacitet linka treba da dosegne bar očekivano opterećenje na tom linku.

U [3] izvršena je i analiza istog sistema, u kome se komunikacija uspostavlja između nekog čvora WMN i *gateway*-a, i svi paketi šalju se ka žičnoj mreži preko njega. Ako čvor uoči putanju sa boljim karakteristikama, preko nekog drugog *gateway*-a, povezuje se na njega. Razlika u pristupu prilikom komunikacije između čvora WMN i *gateway*-a je u funkciji dobitka sistema, koju treba maksimizirati, a koja je definisana sa:

$$X = \sum_a \min \left(\sum_i C(a, g_i), B(a) \right),$$

gde je $C(a, g_i)$ koristan raspoloživ propusni opseg veze između agregacionog čvora a i *gateway*-a g_i . $B(a)$ je zahtevani propusni opseg između agregacionog čvora i žične mreže, i propusni opseg ne sme biti veći od njega.

Svaki *gateway* predstavlja koren stabla, čvorovi koji se na njega vezuju su direktne grane korena, a stablo se dalje širi. Algoritam konstrukcije stabla opisan je u [3].

Upoređivanjem mreža sa jednim i više kanala, dobija se da je dobitak sistema mnogo bolji kod višekanalne WMN [2], [3]. Upoređene su tri metode dodele kanala: svakom čvoru isti kanal, dodela kanala na osnovu izabranih kanala susednih čvorova, ili dodela kanala u kojoj se u obzir uzima opterećenje mreže. Najveći dobitak sistema dobija se u trećem slučaju. Korišćenjem samo dve NIC kartice po čvoru može se postići višestruko veći dobitak sistema, i u slučaju komunikacije između dva čvora mreže, i u slučaju komunikacije između nekog čvora i *gateway*-a.

Prednost ovakvog pritupa je u tome što ne koristi *channel switching* već problem višestrukih kanala rešava ugradnjom NIC kartica na svaki čvor, čime se dobija univerzalno rešenje za razne metode rutiranja i popravljiva dobitak mreže.

Korišćenjem mreže sa q NIC kartica na svakom čvoru, broj kanala u mreži ograničen je na q , a broj raspoloživih kanala na frekvencijama koje se ne preklapaju može biti mnogo veći od q . Takođe, nije dovoljno samo jednostavno povezati svaku NIC karticu na različit kanal, jer nisu svi kanali jednako iskorišćeni. Ovakvim pristupom može se desiti da mreža ne bude u potpunosti povezana. U višekanalnim WMN mreža je dinamična, i može se desiti da dva čvora istovremeno pokušaju da uspostave vezu preko istog linka. Konstantno proveravanje kroz koji je čvor ili *gateway* bolje usmeriti komunikaciju, zahteva često osvežavanje tabela za rutiranje svih čvorova. Kako je dobitak putanje promenljiv, može doći do nekonvergentnog ponašanja mreže, pa su potrebna dodatna merenja.

B. Dodela kanala u višekanalnim WMN pomoću distribuirane koordinacione funkcije (DCF)

Radi ostvarenja višestrukog pristupa na MAC sloju, u [4] se koristi distribuirana koordinaciona funkcija (DCF). Postoji c frekvencijskih kanala koji se ne preklapaju, i

svaki čvor ima q NIC kartica.

Za opis mreže koristi se nedirekcionni graf. Rasporede se kanali u svakom čvoru. Domet emitovanja čvorova je fiksiran i poznat. Link između dva čvora uspostavlja se kada su čvorovi u međusobnom dometu i postoji isti kanal kod oba čvora. Od dodele kanala zavisi topologija mreže. U [4] opisani su INSTC (*Minimum Interference Survivable Topology Problem*) i BAR (*Bandwidth Aware Routing*) problemi. INSTC je problem dodele kanala tako da mrežna topologija ima što manju interferenciju. BAR je problem raspodele protoka kroz mrežu tako da ukupan protok bude jednak nekom unapred definisanom, i da suma protoka svih kanala nekog čvora bude manja od raspoloživog protoka na tom čvoru. Predložene su dve heuristike raspodele kanala, u kojima se u obzir uzima maksimalno smanjenje interferencije.

Upoređeni su pristupi u kojima se primenjuje BAR algoritam i obraća pažnja na problem interferencije, i pristup sa MBCP (*Maximum Bottleneck Capacity Path*) heuristikom i prostom dodelom kanala. BAR algoritam pokazao se boljim. Takođe, i ovakvim pritupom dobijeno je da je dobitak mreže višestruko bolji u slučaju primene višekanalnih WMN.

III. ALGORITMI RUTIRANJA ZA WMN

U daljem tekstu biće opisano i upoređeno nekoliko različitih metrika koje se primenjuju za rutiranje u WMN [5]-[9]. U svim analiziranim metrikama pretpostavljeno je da WMN rade na više kanala.

A. HOP counting

HOP *counting* je jednostavna metrika u kojoj se putanja formira tako da paketi prođu kroz najmanji broj čvorova.

B. Per-hop RTT (Round-Trip-Time)

RTT metrika zasniva se na merenju kašnjenja probnog paketa [5]. Čvor šalje probni paket u kom je upisan trenutak slanja, svojim susedima, svakih 500ms. Svaki sused, po primanju paketa, šalje ACK i u njega upisuje vreme prijema paketa. Predajni čvor tako može da odredi u koji susedni čvor paket stiže za najkraće vreme RTT, i da pošalje rezultate svih kašnjenja svim svojim susedima. Algoritam rutiranja bira putanju sa najmanjom sumom RTT-ova. Prilikom rutiranja ovom metrikom javlja se problem tzv. samo-interferencije. RTT metrika zavisi od opterećenja u mreži, i može se desiti da čvor dugo čeka da se oslobodi link preko kog treba da šalje paket, usled čega dolazi do velikog kašnjenja i povećanja vrednosti RTT. Zbog toga je kvalitet servisa mnogo lošiji.

C. Per-hop packet pair

PktPair metrika zasniva se na merenju kašnjenja para paketa ka susednim čvorovima [5]. Stvorena je da reši problem izobličenja kod RTT metrike nastalih usled kašnjenja paketa. Čvor šalje par probnih paketa, ka svakom od susednih čvorova, svake 2 sekunde. Prvi paket je mali, a drugi veliki. Susedni čvor računa kašnjenje između prijema prvog i drugog paketa. Nakon toga vraća rezultat proračuna kašnjenja čvoru koji je poslao pakete.

Predajni čvor tada šalje rezultate svih kašnjenja ka svim svojim susedima. Algoritmom rutiranja formira se putanja u kojoj je suma tih kašnjenja najmanja. Ako drugi probni paket zahteva retransmisiju ARQ-a (*Automatic Repeat Request*) porašće kašnjenje signala. Ako link od čvora ka njegovim susedima ima mali protok, drugom paketu će biti potrebno više vremena da stigne do odredišta. Kada se šalju probni paketi, na slobodan link čeka se samo prilikom slanja prvog paketa, za drugi paket je link već slobodan, pa je kašnjenje manje nego kod RTT metrike.

D. ETX (*Expected Transmission Count*)

ETX metrika računa broj potrebnih emisija *unicast* paketa pomoću merenja gubitka *broadcast* paketa između para susednih čvorova. U [6] detaljno je opisana ETX metrika. Svaki čvor šalje *broadcast* probni paket svake sekunde. U paketu se nalazi broj probnih paketa koje je čvor koji ga šalje primio od susednih čvorova u poslednjih 10 sekundi. Na osnovu broja primljenih probnih paketa, čvor može izračunati gubitak paketa na linkovima od i ka svojim susednim čvorovima. Algoritmom rutiranja pronalazi se putanja sa najmanjim brojem retransmisija paketa. Kako svaki čvor šalje *broadcast* umesto *unicast* probne poruke, probne poruke zauzimaju mnogo manji kapacitet mreže. U ovoj metrici je u većoj meri prevaziđen problem samo-interferencije, jer se ne mere kašnjenja u mreži.

E. WCETT (*Weighted Cumulative Expected Transmission Time*)

Ova metrika primenjena je na WMN čiji kanali mogu podržavati 802.11 a, g i b standarde. Čvorovi u mreži su stacionarni. Metrika je zasnovana na računanju ETT (*Expected Transmission Time*), odnosno predstavlja modifikaciju ETX metrike. U ovom algoritmu rutiranja vodi se računa i o kapacitetu mreže i o verovatnoći gubitka paketa. WCETT (*Weighted Cumulative Expected Transmission Time*) metrika kombinuje se sa LQSR (*Link Quality Source Routing*) protokolom, opisanim u [7]. Tako nastao protokol naziva se MR-LQSR (*Multi Radio Link Quality Source Routing*). Ovaj protokol ima četiri osnovna parametra: prvi određuje koji su susedni čvorovi svakog čvora u mreži, drugi opisuje dodeljene težine linkova za svaki čvor sa njemu susednim čvorovima, treći prenosi te informacije kroz mrežu, a četvrti koristi težine linkova radi proračunavanja najbolje putanje između zadatih čvorova. Svakom linku se dodeljuje vrednost ETT koja pretstavlja očekivano očekivano vreme potrebno za prenos paketa kroz taj link. Za svaku putanju između čvorova mreže, računa se koliko je koji kanal, kroz koji su se prenosili podaci, bio opterećen. Kanalu i dodeljuje se vrednost X_i kao zbir ETT-ova onih linkova koji rade na i -tom kanalu. Putanji se dodeljuje vrednost WCETT koja zavisi od zbira ETT-ova linkova duž nje i opterećenja kanala duž te putanje sa najvećim X . Bira se putanja koja ima najmanju vrednost WCETT.

F. Quality aware routing metrics (QAR) - mETX i ENT

QAR metrike su metrike koje treba da obezbede garantovani protok zahtevan od strane korisnika. U [8] su

opisane dve metrike mETX i ENT. mETX je metrika u kojoj se delimično modifikuje ETX. Cena linka je mETX, što predstavlja veličinu koja zavisi od srednjeg nivoa verovatnoće gubitka paketa tokom dugog vremenskog perioda, kao i od protoka koji je zahtevan za različite vrste podataka. Svakom linku dodeljuje se za njega proračunata vrednost mETX, i rutiranje je pronalazjenje putanje sa najmanjim zbirom mETX-ova.

Kada se bira putanja koja maksimizira dobitak na sloju linka, u takvu putanju mogu se uračunati i linkovi koji imaju veliku verovatnoću gubitka paketa. Zbog toga se uvodi nova metrika, ENT (*Effective Number of Transmissions*) u kojoj se, pored broja retransmisija paketa (ETX i mETX), uračunava i verovatnoća da broj retransmisija bude veći od nekog zadatog broja. Neka je M maksimalni broj dozvoljenih retransmisija po bilo kom linku. Svakom linku se dodeljuje težina linka na sledeći način: ako je $\log(ENT)$ za određeni link veći od $\log M$, tom linku se dodeljuje beskonačna težina, ostalim linkovima dodeljuje se težina $\log(ENT)$. Rutiranje je pronalazjenje putanje sa najmanjim zbirom $\log(ENT)$ -a.

G. Normalized advance (NADV)

NADV metrika je predviđena za geografska rutiranja u WMN. Susedi razmenjuju lokalne informacije koje su dobili preko GPS-a ili nekom drugom tehnikom alokacije. Razlikuje se cena i metrika linka. Primer cene linka je portošnja snage potrebna za prenos paketa, a u metriku se uračunavaju još neki parametri, osim cene linka. Cilj je da se pronađe takva metrika u kojoj se rutiranje vrši jednako dobro za različito definisane cene linkova (nezavisno da li je cena potrošnja snage, kašnjenje i sl.). Metrika koja se uvodi naziva se NADV (*normalized advance*) i detaljno je opisana u [9]. Uvodi se veličina *advance* $ADV(n)$ koja predstavlja razliku rastojanja trenutnog čvora S i rastojanja njemu susednog čvora n , od odredišnog čvora T . Nakon toga definiše se $NADV(n)$ kao količnik $ADV(n)$ i cene linka od čvora S ka njemu susednom čvoru n , $Cost(n)$. Uvodi se veličina *Total Cost*, koju je potrebno minimizirati:

$$TotalCost = DIST * \frac{Cost(x)}{ADV(x)}$$

DIST je rastojanje između predajnog i prijemnog čvora. U [9] je upoređeno rutiranje kada se za cenu linka uzimaju različite vrednosti: ETX, model u kome je cena linka kašnjenje, i model u kom je cena potrošnja snage.

H. Poređenje metrika

Kada se uporede HOP, RTT, PktPair i ETX metrike dolazi se do sledećih rezultata. Sa stanovišta dobitka sistema RTT metrika ima najmanji dobitak sistema. Nešto bolji dobitak ima PktPair, pa HOP, a najbolji dobitak ima ETX metrika. Za isti par čvorova koje treba povezati, kroz najmanje linkova se prolazi primenom HOP metrike, pa ETX, a RTT i PktPair metrike daju putanje sa najvećim brojem linkova. Primenom RTT metrike pronalazi se najveći broj različitih putanja kojima mogu spojiti dva čvora, PktPair metrikom nešto manje, ETX metrikom još manje, a HOP metrikom najmanje (Tabela 1). Samo-

interferencija najizraženija je kod RTT, kod PktPair metrike je donekle smanjen ovaj problem, a najbolje rezultate dala je ETX metrika. Osetljivost na opterećenje kanala je najizraženija kod RTT, veoma je izražena kod PktPair, a najmanju osetljivost ima ETX. Iz navedenog može se zaključiti da se ETX pokazala najboljom po različitim osnovama [5], [6]. Prilikom slanja probnih paketa, mreža ne trpi veliko opterećenje, pa se problem opterećenja linka kod ETX metrike ne vidi. Takođe, ne vodi se računa o kvalitetu servisa.

TABELA 1: UPOREĐENJE METRIKA.

Metrika	HOP	ETX	RTT	PktPair
Broj linkova	2	3	4	4
Broj putanja	3	5	20	12
Protok [Mbps]	1	1.5	0.4	0.8

Metrike WCETT, mETX i ENT su modifikacije ETX metrike u kojima se uvodi praćenje opterećenja linka i vodi računa o kvalitetu servisa. Dobitak sistema primenom WCETT metrike je i do 60% bolji nego u slučaju ETX. Kada se uporede mreže sa istim protokolom, kod kojih se primenjuju mETX i ENT, u odnosu na mrežu u kojoj se primenjuje ETX metrika, dobija se verovatnoća gubitka paketa i do 50% manja u slučaju primene mETX i ENT metrika. Pored velikog protoka, dobija se mnogo manja verovatnoća gubitka paketa. Kada je upoređena mreža sa 20 čvorova primenom ovih metrika, dobijeno je da je verovatnoća gubitka paketa kod ETX metrike 0.15, kod mETX 0.08, a kod ENT metrike 0.04 [6]-[8].

Za razliku od metrika ETX, WCETT, mETX i ENT, koje su zasnovane na protokolima rutiranja *on-demand*, NAVD metrika je zasnovana na geografskom rutiranju gde se za svaki čvor zna tačna geografska lokacija. Pozicija odredišnog čvora poznata je i određuje se tehnikama alokacije. Ovo je metrika u kojoj se mogu menjati parametri koji određuju cenu rutiranja [9]. Dalje unapređenje NAVD predviđa uračunavanje nekoliko parametara istovremeno u cenu linka, čime se dobija optimalnija putanja, koja zadovoljava strožije kriterijume.

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisano je nekoliko pristupa dodele kanala i rutiranja u *wireless mesh* mrežama. Upoređene su WMN mreže sa jednim i više kanala. Dobitak mreže mnogo je bolji u slučaju kada se koristi više kanala na svakom čvoru. Upoređena su dva pristupa WMN sa više kanala, komutacija kanala i korišćenje NIC kartica. Komutaciju kanala teško je ostvariti bez promena na MAC sloju IEEE 802.11 standarda, jer zahteva finu podešenost između čvorova, i zato je lakše koristiti NIC kartice. U nastavku rada obrađene su različite metrike koje se mogu koristiti prilikom rutiranja u WMN. Kada su upoređene HOP, RTT, PktPair i ETX metrika, ETX metrika se pokazala najboljom po pitanju kašnjenja, protoka, male samo-interferencije. Kako ETX metrika ne vodi računa o zahtevanom kvalitetu servisa, obrađene su njene modifikacije WCETT, mETX i ENT, koje su na različite

načine uzimale u obzir kvalitet servisa. Osim navedenih, obrađena je i NAVD metrika koja se koristi za geografska rutiranja, i u kojoj više parametara utiče na cenu linka.

Može se reći da je ETX metrika suštinski najbolja, i dalja poboljšanja svode se na njene modifikacije. Dalje unapređenje ETX metrike može se usmeriti ka kombinaciji više parametara koji utiču na kvalitet prenosa signala, odnosno, da se u cenu linkova uračunaju i kašnjenje, mala potrošnja snage, opterećenost mreže, i time ostvari još bolji dobitak sistema i još kvalitetniji prenos podataka.

LITERATURA

- [1] E. Hossain, and K. Leung, "Wireless Mesh Networks, Architectures and Protocols," *Springer*, 2008.
- [2] A. Raniwala, K. Gopalan, and T. Chiueh, "Centralized Channel Assignment and Routing Algorithms for Multi-Channel Wireless Mesh Networks," *ACM Mobile Computing and Communications Review*, April 2004.
- [3] J. Tang, G. Xue, and W. Zhang, "Interference-aware topology control and QoS routing in multi-channel wireless mesh networks", in *Proc. of ACM MobiHoc* 2005.
- [4] A. Adya, P. Bahl, J. Padhye, A. Wolman, and L. Zhou. "A multi-radio unification protocol for IEEE 802.11 wireless networks", In *BroadNets*, 2004.
- [5] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, "Comparison of routing metrics for static multi-hop wireless networks", in *Proc. of ACM SIGCOMM* 2004.
- [6] D. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris. "High-throughput path metric for multi-hop wireless routing". In *MOBICOM*, Sep 2003.
- [7] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill. "The architecture of the Link Quality Source Routing Protocol", *Technical Report MSR-TR-2004-57*, Microsoft Research, 2004.
- [8] C.E. Koksal, H. Balakrishbab. "Quality Aware Routing Metrics for Time Varying Wireless Mesh Networks", *IEEE journal on selected areas in communications*, 2006.
- [9] S. Lee, B. Bhattarjee, and S. Banerjee. "Efficient Geographic Routing in Multihop wireless Networks" in *MobiHoc*, 2005.

ABSTRACT

The routing layer is one of the key communication protocol layers for efficient use of the resources in a Wireless Mesh Network (WMN).

In WMN the main aim is to achieve better quality and efficiency of data transmission from sender to receiver. Better quality and efficiency of transmission means low delay, high data rate, low loss rate, etc. To achieve such transmission, different parameters influencing data transmission need to be optimized. This paper gives an overview of the routing methods, and discusses how to find an optimal routing method. A comparison between WMN with a single radio channel and multi radio WMN is given, and methods of channel assignment in multi radio WMN are compared with respect to their characteristics, advantages and disadvantages. A few different routing algorithms are overviewed, and their characteristics are compared using various performance metrics.

OVERVIEW OF THE ROUTING METHODS IN WIRELESS MESH NETWORKS

Marija Malnar