DINAMIČNO USMERJANJE Z ZAVEDANJEM IN UPOŠTEVANJEM LASTNOSTI OMREŽNEGA KODIRANJA V BREZŽIČNIH OMREŽJIH

Erik Pertovt

Doktorska disertacija
Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana
Ljubljana, Slovenija

Mentor: izr. prof. dr. Mihael Mohorčič, Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana, Slovenija
Somentor: izr. prof. dr. Aleš Švigelj, Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana, Slovenija

Komisija za oceno doktorske disertacije:
prof. dr. Gorazd Kandus, predsednik, Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana, Slovenija
doc. dr. Tomaž Javornik, član, Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana, Slovenija
prof. dr. Andrej Košir, član, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Slovenija

MEDNARODNA PODIPLOMSKA ŠOLA JOŽEFA STEFANA
JOŽEF STEFAN INTERNATIONAL POSTGRADUATE SCHOOL



Erik Pertovt

DINAMIČNO USMERJANJE Z ZAVEDANJEM IN UPOŠTEVANJEM LASTNOSTI OMREŽNEGA KODIRANJA V BREZŽIČNIH OMREŽJIH

Doktorska disertacija

DYNAMIC NETWORK CODING-AWARE ROUTING IN WIRELESS NETWORKS

Doctoral Dissertation

Mentor: izr. prof. dr. Mihael Mohorčič

Somentor: izr. prof. dr. Aleš Švigelj

Ljubljana, Slovenija, december 2015

Zahvala

Zahvaljujem se svojemu mentorju izr. prof. dr. Mihaelu Mohorčiču in somentorju izr. prof. dr. Alešu Švigelju za mentorstvo, nasvete in pomoč pri izdelavi doktorske disertacije ter spremljanje in podporo pri mojem raziskovalnem delu v celotnem obdobju podiplomskega študija.

Zahvaljujem se tudi ostalemu osebju na Odseku za komunikacijske sisteme na Institutu »Jožef Stefan«.

Prav tako se zahvaljujem članom komisije za pregled doktorske disertacije.

Raziskovalno delo je finančno omogočila Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

Povzetek

Priložnostno omrežno kodiranje (angl. opportunistic network coding) je tehnika, ki se jo v zadnjem času raziskuje za povečanje pretoka prometa in posledično izboljšanje delovanja brezžičnih zankastih omrežij. Dobitek omrežnega kodiranja je mogoče nadalje povečati, če se usmerjanje prometa po omrežju izvede z zavedanjem in upoštevanjem uporabe omrežnega kodiranja, katerega cilj je najti in izkoriščati poti s priložnostmi za kodiranje in tako povečati pretok prometa v omrežju.

Cilj doktorske disertacije je pokazati, da je ob upoštevanju uporabe omrežnega kodiranja in informacije o izmerjeni uspešnosti kodiranja prometa mogoče preprečiti zasičenje v omrežju in s tem posredno povečati kodirni dobitek in pretok prometa. S tem namenom predlagamo nov proaktivni usmerjevalni postopek za preprečevanje zasičenja z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja CANCAR, ki omogoča detekcijo trenutno najbolj obremenjenega vozlišča in preprečitev njegovega zasičenja s pomočjo preusmeritve slabše kodiranih prometnih tokov. Na ta način omogoča postopek CANCAR: 1) dodatni kodirni dobitek za preostale dobro kodirane prometne tokove na vozlišču, 2) boljše kodiranje preusmerjenih nekodiranih ali slabše kodiranih prometnih tokov na ostalih vozliščih in 3) manjšo prometno obremenitev na trenutno najbolj obremenjenem vozlišču ter njegovi neposredni okolici.

V disertaciji najprej predstavimo osnove omrežnega kodiranja s poudarkom na uporabi v brezžičnih zankastih omrežjih. S pomočjo enostavnih mrež pokažemo prednosti uporabe omrežnega kodiranja in predstavimo omrežno kodirni postopek COPE za izkoriščanje kodirnih priložnosti, ki se lokalno pojavijo pri enem skoku med vozlišči. Nadalje predstavimo osnove in klasifikacijo postopkov dinamičnega usmerjanja v brezžičnih zankastih omrežjih ter prednosti uporabe usmerjanja z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja s pregledom in ovrednotenjem obstoječih rešitev. Slednje se predvsem osredotočajo na povečevanje priložnosti za kodiranje s pomočjo informacije o topologiji omrežja ter trenutnih prometnih tokovih v omrežju. Večina jih temelji na uporabi reaktivnega izvornega tipa usmerjanja, ki potrebuje najprej zajem informacije za usmerjanje s pomočjo protokola za odkrivanje poti, kar povzroči dodatne zakasnitve. Zato je takšen tip usmerjenja primeren predvsem za promet z manjšim številom prometnih tokov in manjšimi spremembami komunikacijskih vzorcev v omrežju.

Kot alternativno rešitev predlagamo inovativen postopek usmerjanja, imenovan CANCAR, ki deluje na podlagi meritev o uspešnosti kodiranja v omrežju. S pomočjo detektiranja visokih prometnih obremenitev v omrežju in razlikovanja med dobro in slabo kodiranimi prometnimi tokovi omogoča usmerjanje najslabše kodiranega prometa stran od ozkih grl ter s tem preprečevanje zasičenja ter povečevanje števila priložnosti za kodiranje. Predlagana izvedba postopka CANCAR uporablja proaktivno usmerjanje, ki se izkaže kot primernejše za uporabo v kombinaciji z meritvami o uspešnosti kodiranja v omrežju zaradi manjših zakasnitev pri usmerjanju. Takšno usmerjanje je primernejše za uporabo pri prometu z večjim številom prometnih tokov in večjimi spremembami komunikacijskih vzorcev v omrežju. Za računanje optimalnih poti je primeren Dijkstrov usmerjevalni algoritem stanja povezav v kombinaciji z aditivno metriko ETX kot ceno povezav. Postopek CANCAR je neodvisen od uporabljenega omrežno kodirnega postopka, za potrebe ovrednotenja postopka glede na uveljavljeno referenčno rešitev pa smo v doktorskem delu uporabili postopek COPE.

Delovanje usmerjevalnega postopka CANCAR smo ovrednotili z modularno zasnovanim simulacijskim modelom, ki omogoča upoštevanje različnih prometnih vzorcev. Model vsebuje ključne funkcije za potrebe ovrednotenja delovanja omrežja s stališča usmerjanja, vključno z izvirnim modelom uspešnosti paketnega prenosa preko brezžičnih povezav, razvitim za upoštevanje lastnosti brezžičnih povezav pri preučevanju

postopkov na omrežnem sloju, kjer je za obvladovanje simulacijske zahtevnosti potrebno zmanjšati število simulacijskih dogodkov. Slednje je še posebej pomembno pri upoštevanju visokih prometnih obremenitev v omrežju, značilnih za preučevanje postopkov omrežnega kodiranja.

Učinkovitost postopka CANCAR ovrednotimo na podlagi primerjave koristnega prometnega pretoka, kodirnega dobitka vozlišč, števila kodiranih paketov, kodirnih priložnosti v prometnih tokovih ter kodirnih priložnosti na vozliščih. Delovanje usmerjanja predlaganega postopka primerjamo z uporabo omrežnega kodiranja v kombinaciji s tradicionalnim postopkom usmerjanja brez upoštevanja lastnosti omrežnega kodiranja. Simulacijski rezultati, pridobljeni na manjši referenčni omrežni topologiji in večjih sintetično generiranih omrežnih topologijah, dokazujejo, da usmerjevalni postopek CANCAR v kombinaciji z dobro poznanim omrežno kodirnim postopkom COPE izboljša učinkovitost uporabe omrežnega kodiranja in dinamičnega usmerjanja v omrežju. Postopek preprečuje prometne preobremenitve in pojav zasičenja omrežja ter zagotavlja večji kodirni dobitek, s čimer dosega bistveno večji pretok prometa in dovoljuje večje prometne obremenitve v omrežju.

Abstract

Opportunistic network coding is an approach recently investigated for increasing the network throughput and thus enhancing the performance of wireless mesh networks. The benefits of network coding can further be improved when routing decisions are made with the awareness of coding. Typically, the goal of network coding-aware routing is to find and exploit routes with new coding opportunities and thus increase the network throughput.

The aim of this dissertation is to show that the coding awareness along with the information of the measured traffic coding success can be efficiently used for congestion avoidance, thus indirectly increasing the coding gain and the network throughput. We propose a new proactive routing procedure called Congestion-Avoidance Network Coding-Aware Routing (CANCAR), in which the most loaded node is detected and prevented from saturation by diverting some of the least-coded traffic flows around this node. By doing so, CANCAR enables: 1) even higher coding gain achieved by the remaining well-coded traffic flows on the node, 2) possibly better encoding of the diverted non-coded or less-coded traffic flows along the alternative routes, and 3) lower traffic loads traversing the currently most loaded node and its neighborhood.

In the dissertation, we first present the basic principles of opportunistic network coding in wireless mesh networks. We show the benefits of using network coding in theoretical topologies and present COPE network coding procedure, which exploits coding opportunities that occur on a per-hop basis between nodes. Furthermore, we present the basics and classification of dynamic routing procedures in wireless mesh networks, as well as the benefits of network coding-aware routing with an overview and evaluation of the prior work. In the latter, coding opportunities are computed based on the given topology and temporal traffic in the network to discover paths with more coding opportunities. Most of the proposed schemes are based on on-demand (i.e., reactive) source routing paradigm, requiring firstly the acquisition of the routing information obtained by a route discovery protocol, which introduces additional delay, making these routing schemes suited for rather sparse and static communication patterns.

As an alternative solution, we propose a novel routing procedure called CANCAR, which explores the actually measured coding success in various traffic flows. By detecting high traffic in the network and discriminating between well and poorly-coded traffic flows in congested area of the network, it primarily facilitates rerouting of poorly-coded traffic away from most loaded parts of the network and thus avoiding the congestion and increasing the number of coding opportunities in the network. The proposed implementation of CANCAR is based on table-driven (or proactive) per-hop routing, which is better suited for dense communication patterns. For the routes calculation, Dijkstra's link-state routing algorithm with ETX additive metric for link cost is used as conventional routing. We consider COPE as a reference underlying network coding procedure also used by CANCAR, although the latter can be used with other opportunistic network coding algorithms.

We evaluated the CANCAR routing procedure in a modular network coding simulation model, which enables using various traffic patterns. In the model, the key functionalities for the performance evaluation from the routing point of view are implemented, including a novel model of packet transmission via wireless link, developed for consideration of the wireless link characteristics in investigation of network layer procedures, where the number of simulation events needs to be as low as possible to keep the simulation complexity at a manageable level. This is particularly important in studies requiring very intensive traffic loads, such as in case of network coding procedures.

The performance of CANCAR is evaluated on the results of network goodput, the node coding gain, the number of encoded packets, coding opportunities in flows and coding opportunities on nodes. We quantify the benefits of CANCAR over the network coding with

the conventional coding unaware routing. The simulation results obtained in a small reference network topology and in larger synthetically generated network topologies show that the proposed routing procedure CANCAR combined with the well-known COPE network coding avoids network congestion and provides higher coding gains, thus achieving significantly higher throughput and enabling higher traffic loads.

Kazalo

Slike **xvii**

Tabele **xix**

Kratice **xxi**

1 Uvod **1**
1.1 Prispevki doktorske disertacije ... 2
1.2 Struktura doktorske disertacije ... 3

2 Omrežno kodiranje in usmerjanje v brezžičnih zankastih omrežjih **5**
2.1 Omrežno kodiranje ... 5
2.1.1 Osnove priložnostnega omrežnega kodiranja ... 5
2.1.2 Omrežno kodiranje v brezžičnih zankastih omrežjih ... 6
2.1.3 Omrežno kodirni postopek COPE ... 7
2.1.3.1 Opis postopka pri oddaji paketov ... 7
2.1.3.1.1 Prikaz delovanja algoritma kodiranja ... 8
2.1.3.2 Opis postopka pri sprejemu paketov ... 9
2.2 Dinamično usmerjanje ... 10
2.2.1 Funkcije usmerjanja ... 10
2.2.2 Načini usmerjanja ... 10
2.2.2.1 Statično in dinamično usmerjanje ... 10
2.2.2.2 Centralizirano in porazdeljeno usmerjanje ... 10
2.2.2.3 Usmerjanje na podlagi stanja povezav in usmerjanje na podlagi vektorja razdalj ... 11
2.2.2.4 Reaktivno in proaktivno usmerjanje ... 11
2.2.2.5 Izvorno in etapno usmerjanje ... 12
2.2.2.6 Usmerjanje po eni poti in usmerjanje po več poteh ... 12
2.2.3 Usmerjevalni protokoli ... 12
2.2.3.1 DSDV protokol ... 12
2.2.3.2 Protokol DSR ... 13
2.2.3.3 SRCR protokol ... 14
2.2.4 Usmerjevalni algoritmi ... 14
2.2.4.1 Dijkstrov algoritem ... 14
2.2.4.2 Bellman-Fordov algoritem ... 15
2.2.5 Usmerjevalne metrike ... 15
2.2.5.1 Metrika ETX ... 15
2.2.5.2 Metrika ETT ... 16
2.3 Usmerjanje z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja ... 16
2.3.1 Izkoriščanje usmerjanja za omrežno kodiranje brez prisluškovanja ... 17
2.3.2 Izkoriščanje usmerjanja za omrežno kodiranje s prisluškovanjem ... 19
2.4 Postopki usmerjanja z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja ... 21
2.5 Umestitev predlaganega postopka usmerjanja glede na obstoječe postopke ... 23

3 Postopek dinamičnega usmerjanja CANCAR **25**
3.1 Zasnova preusmerjanja na podlagi uspešnosti pri kodiranju ... 25
3.2 Postopek usmerjanja CANCAR ... 30
3.2.1 Zbiranje in distribucija informacije za usmerjanje ... 31
3.2.2 Izračun najkrajših poti ... 31
3.2.3 Izračun in izbor alternativnih poti ... 31

3.2.3.1 Določitev najbolj obremenjenega vozlišča 31
3.2.3.2 Izračun alternativnih poti 32
3.2.3.3 Preusmeritev na alternativne poti 32
3.2.3.4 Obveščanje vozlišč o izboru alternativnih poti 32
3.2.3.5 Usmerjanje paketov 32
3.3 Algoritem za usmerjanje z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja 33
3.3.1 Razvrščanje prometnih tokov 35
3.3.2 Preverjanje obstoja alternativne poti 35
3.3.3 Preverjanje števila skokov na alternativni poti 36
3.3.4 Preverjanje količine prometa na alternativni poti 36
3.3.5 Določitev alternativne poti kot usmerjevalne poti za promet 36
3.3.6 Preverjanje količine prometa, izbrane za preusmeritev iz najbolj obremenjenega vozlišča 36
3.3.7 Izbiranje naslednjega prometnega toka 37
3.4 Ovrednotenje signalizacije za predlagano usmerjanje 37
3.5 Povzetek 39

4 Simulacijski model za omrežno kodiranje in usmerjanje 41
4.1 Zasnova simulacijskega modela 41
4.1.1 Modul paketnega generatorja/ponora 43
4.1.2 Modul usmerjanja 44
4.1.3 Modul omrežnega kodiranja 44
4.1.4 Brezžični modul 44
4.2 Implementacija usmerjevalnega postopka CANCAR v simulacijski model 45
4.3 Modeliranje paketnega prenosa preko brezžičnih povezav v simulacijskem modelu 48
4.3.1 Modeliranje brezžične povezave v omrežnih simulatorjih 49
4.3.2 Empirični model uspešnosti paketnega prenosa preko brezžične povezave 49
4.3.2.1 Predpostavke pri modelu 49
4.3.2.2 Opis modela 50
4.3.2.2.1 1. faza: Zakasnitev prenosa 51
4.3.2.2.2 2. faza: Modeliranje verjetnosti uspešnega prenosa paketa 51
4.3.2.2.3 3. faza: Odločanje o uspešnosti prenosa 53
4.3.2.2.4 4. faza: Zakasnitev razširjanja 53
4.4 Nivoji simulacijskega modela 54

5 Ovrednotenje delovanja usmerjevalnega postopka CANCAR 59
5.1 Parametri simulacij 59
5.2 Analiza rezultatov simulacij 61
5.2.1 Rezultati za referenčna scenarija 61
5.2.1.1 Koristni omrežni pretok 61
5.2.1.2 Kodirni dobitek vozlišča 62
5.2.1.3 Število kodiranih paketov 65
5.2.1.4 Ocena režijskih stroškov 67
5.2.1.5 Zaključki na podlagi referenčnih scenarijev 67
5.2.2 Rezultati za brezžična zankasta omrežja 67
5.2.2.1 Koristni omrežni pretok 69
5.2.2.2 Število kodiranih paketov 76
5.2.2.3 Priložnosti za kodiranje v prometnih tokovih 78
5.2.2.4 Priložnosti za kodiranje na vozliščih 80
5.2.2.5 Uspešnost prenosa paketov pri posameznem prometnem toku 82
5.2.2.6 Ocena režijskih stroškov 84
5.2.3 Povzetek rezultatov 84

6 Zaključki 85

Literatura 87

Bibliografija 91

Biografija 93

Slike

Slika 2.1: Prenos paketov preko posrednika brez priložnostnega prestrezanja: (a) brez uporabe omrežnega kodiranja, (b) z omrežnim kodiranjem. 6
Slika 2.2: Prenos paketov preko posrednika s priložnostnim prestrezanjem: (a) brez uporabe omrežnega kodiranja, (b) z omrežnim kodiranjem. 7
Slika 2.3: Ponazoritev delovanje kodirnega algoritma COPE. 9
Slika 2.4: Brezžični povezavi med vozliščema i in j z referenčnima verjetnostma uspešnega prenosa. 16
Slika 2.5: Usmerjanje pri omrežnem kodiranju brez prisluškovanja I: (a) brez zavedanja uporabe omrežnega kodiranja, (b) z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja. 17
Slika 2.6: Usmerjanje pri omrežnem kodiranju brez prisluškovanja II: (a) brez zavedanja uporabe omrežnega kodiranja, (b) z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja. 18
Slika 2.7: Usmerjanje pri omrežnem kodiranju brez prisluškovanja III: (a) brez zavedanja uporabe omrežnega kodiranja, (b) z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja. 19
Slika 2.8: Usmerjanje pri omrežnem kodiranju s prisluškovanjem I: (a) brez zavedanja uporabe omrežnega kodiranja, (b) z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja. 20
Slika 2.9: Usmerjanje pri omrežnem kodiranju s prisluškovanjem II: (a) brez zavedanja uporabe omrežnega kodiranja, (b) z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja. 20
Slika 3.1: Referenčni scenarij 1: usmerjanje brez upoštevanja omrežnega kodiranja. 27
Slika 3.2: Referenčni scenarij 1: zasnova preusmerjanja na podlagi uspešnosti pri kodiranju. 28
Slika 3.3: Referenčni scenarij 2: usmerjanje brez upoštevanja omrežnega kodiranja. 29
Slika 3.4: Referenčni scenarij 2: zasnova preusmerjanja na podlagi uspešnosti pri kodiranju. 30
Slika 3.5: Shema algoritma za preusmeritev na alternativne poti. 34
Slika 4.1: Arhitektura simulacijskega modela. 42
Slika 4.2: Potek prenosa paketa v simulacijskem modelu za omrežno kodiranje in usmerjanje. 43
Slika 4.3: Blok shema implementacije postopka CANCAR. 46
Slika 4.4: Faze modela uspešnosti paketnega prenosa preko brezžične povezave. 51
Slika 4.5: Izračun vsote vseh poslanih bitov iz sosednjih vozlišč $R - j$ na vozlišče Rj, razen iz vozlišča Ri. 53
Slika 4.6: Model brezžičnega zankastega omrežja. 55
Slika 4.7: Modul komunikacijskih funkcij posameznega brezžičnega vozlišča 56
Slika 4.8: Modul brezžičnih povezav. 57
Slika 5.1: Koristni omrežni pretok v odvisnosti od prometne obremenitve za scenarij I. 62
Slika 5.2: Koristni mrežni pretok v odvisnosti od prometne obremenitve za scenarij II. 62
Slika 5.3: Izmerjeni kodirni dobitki vozlišč za scenarij I: (a) uporabljen postopek COPE, (b) uporabljen postopek CANCAR. 64
Slika 5.4: Izmerjeni kodirni dobitki vozlišč za scenarij II: (a) uporabljen postopek COPE, (b) uporabljen postopek CANCAR. 65
Slika 5.5: Število kodiranih paketov v odvisnosti od prometne obremenitve za scenarij I. 66

Slika 5.6: Število kodiranih paketov v odvisnosti od prometne obremenitve za scenarij II. 66
Slika 5.7: Sintetično generirane naključne topologije brezžičnih zankastih omrežij. 68
Slika 5.8: Koristni omrežni pretok za topologijo T1 za dva prometna scenarija: (a) simetričen pretok 30 dvosmernih prometnih tokov F30R1, (b) asimetričen pretok 30 dvosmernih prometnih tokov F30R2. 70
Slika 5.9: Koristni omrežni pretok za topologijo T1 za dva prometna scenarija: (a) simetričen pretok 50 dvosmernih prometnih tokov F50R1, (b) asimetričen pretok 50 dvosmernih prometnih tokov F50R2. 71
Slika 5.10: Koristni omrežni pretok za topologijo T2 za dva prometna scenarija: (a) simetričen pretok 30 dvosmernih prometnih tokov F30R1, (b) asimetričen pretok 30 dvosmernih prometnih tokov F30R2. 72
Slika 5.11: Koristni omrežni pretok za topologijo T2 za dva prometna scenarija: (a) simetričen pretok 50 dvosmernih prometnih tokov F50R1, (b) asimetričen pretok 50 dvosmernih prometnih tokov F50R2. 73
Slika 5.12: Koristni omrežni pretok za topologijo T3 za dva prometna scenarija: (a) simetričen pretok 30 dvosmernih prometnih tokov F30R1, (b) asimetričen pretok 30 dvosmernih prometnih tokov F30R2. 74
Slika 5.13: Koristni omrežni pretok za topologijo T3 za dva prometna scenarija: (a) simetričen pretok 50 dvosmernih prometnih tokov F50R1, (b) asimetričen pretok 50 dvosmernih prometnih tokov F50R2. 75
Slika 5.14: Primerjava števila kodiranih paketov v topologijah T1, T2 in T3 z različnimi scenariji prometne obremenitve in uporabljenimi usmerjevalnimi postopki. 77
Slika 5.15: Število kodiranih paketov za postopka COPE in CANCAR v odvisnosti od obremenjenosti omrežja v topologiji T2 pri scenariju F30R1. 78
Slika 5.16: Kumulativna porazdelitvena funkcija (CDF) števila kodiranih paketov v posameznih prometnih tokovih v topologijah T1, T2 in T3 pri uporabi usmerjevalnih postopkov COPE in CANCAR. 79
Slika 5.17: Kumulativna porazdelitvena funkcija (CDF) števila kodiranih paketov v vozliščih v topologijah T1, T2 in T3 pri uporabi usmerjevalnih postopkov COPE in CANCAR. 81
Slika 5.18: Delež uspešno prenešenih paketov pri posameznem prometnem toku v topologijah T1, T2 in T3 pri uporabi usmerjevalnih postopkov COPE in CANCAR. 83

Tabele

Tabela 3.1: Označbe za shemo predstavljenega algoritma. 35
Tabela 5.1: Vrednosti parametrov za postopek CANCAR. 60
Tabela 5.2: Karakteristike raziskanih omrežnih topologij. 69
Tabela 5.3: Maksimalni dobitki postopka CANCAR v primerjavi s postopkom COPE v topologijah T1, T2 in T3 z različnimi scenariji prometne obremenitve 75

Kratice

ACK . . . acknowledgement
ANCHOR . . . Active Network Coding based High-throughput Optimizing Routing
AODV . . . Ad hoc On-demand Distance Vector
C2AR . . . Coding and Capacity Aware Routing
CANCAR . . . Congestion-Avoidance Network Coding-Aware Routing
CAR . . . Congestion Avoidance Rate
CDF . . . cumulative distribution function
CEO . . . Consistency of Encoding and Overhearing
CRM . . . Coding-aware Routing Metric
DCAR . . . Distributed Coding-Aware Routing
DL . . . download traffic
DSR . . . Dynamic Source Routing
DSDV . . . Destination-Sequenced Distance-Vector
ECX . . . Exchange
EPT . . . Estimated Path Throughput
ETC-NC . . . Expected Transmission Count based on Network Coding
ETT . . . Estimated Transmission Time
ETX . . . Expected Transmission Count
ETX-CA . . . Expected Transmission Count with Coding Awareness
FIFO . . . First In First Out
FORM . . . Free-ride-Oriented Routing Metric
ID . . . identification
IoT . . . Internet of Things
MAC . . . Media Access Control
MCR . . . Matched Coding Rate
MIC . . . Metric of Interference and Channel-switching
NCAR . . . Network Coding Aware Routing
OSI . . . Open Systems Interconnection
PER . . . packet error rate
PN-CAR . . . Practical Network-Coding-Aware Routing
RCR . . . Rate-adaptive Coding-aware multiple path Routing
ROCX . . . Routing with Opportunistically Coded Exchanges
RTN . . . Required Transmission Number
SNR . . . signal-to-noise ratio
SRCR . . . Scalable Random Cooperation Routing
UP . . . upload traffic
UDP . . . user datagram protocol
XOR . . . Exclusive OR
WCETT . . . Weighted Cumulative Expected Transmission Time

Poglavje 1

Uvod

Zadnja leta smo priča množični gradnji brezžičnih WiFi dostopovnih točk in brezžičnih senzorskih omrežij. V takšnih omrežjih lahko vozlišča (WiFi dostopovne točke, senzorska vozlišča) komunicirajo preko brezžičnih zankastih povezav. V tem primeru govorimo o brezžičnih zankastih omrežjih (Akyildiz & Wang, 2005). Vozlišča v zankastem omrežju komunicirajo med seboj preko eno- ali večetapnih brezžičnih povezav, nekatera izmed teh vozlišč pa so preko žičnih povezav tudi povezana v fiksno internetno omrežje. Z večetapnimi povezavami zagotovimo pokritost širšega območja delovanja brezžičnega omrežja v primerjavi z enoetapnimi povezavami točka-točka, vendar se v primerjavi z eno-etapnimi zmanjša prepustnost omrežja. S pojavom interneta stvari (IoT) in v prihajajočem mobilnem omrežju 5G lahko pričakujemo vse več zankastih omrežij.

Na področju brezžičnih zankastih omrežij so bili razviti številni mehanizmi za povečanje prepustnosti in zmanjšanje posledic večetapnih povezav ter izboljšanje delovanja omrežij. Med te mehanizme spada tudi omrežno kodiranje (Ahlswede, Cai, Li, & Yeung, 2000), ki je zadnje čase deležno vse večje pozornosti. Omrežno kodiranje se lahko uporablja v različnih slojih protokolnega sklada modela Odprtega sistema povezovanja (OSI). Namesto uporabe mehanizma »sprejem in oddaja« (angl. receive and forward mechanism) za posamezno posredovanje osnovnih informacijskih blokov (na primer paketov) lahko omrežno kodiranje združi skupaj več sprejetih paketov, bodisi iz istega ali različnih prometnih tokov, v en sam kodiran paket in ga posreduje naprej. Na takšen način lahko s pomočjo uporabe omrežnega kodiranja povečamo pretok prometa skozi omrežje oziroma prepustnost omrežja. Priložnostno omrežno kodiranje lahko v brezžičnih zankastih omrežjih izkorišča naravo razpršenega oddajanja (angl. broadcast) v brezžičnem prostoru za ustvarjanje novih kodirnih priložnosti. Vozlišča namreč lahko s pomočjo spremljanja vseh prenosov sprejmejo tudi pakete, ki jim niso neposredno namenjeni. Prestreženi paketi omogočajo, da lahko vozlišča kodirajo več paketov skupaj. V skupino priložnostnega omrežnega kodiranja spada tudi zelo znan omrežno kodirni postopek COPE (Katti, Rahul, Hu, Katabi, Médard, & Crowcroft, 2008).

V doktorski disertaciji se ukvarjamo z omrežnim kodiranjem med slojem MAC in omrežnim slojem modela OSI. Osredotočimo se na potencialne koristi sodelovanja usmerjanja prometa in omrežnega kodiranja v brezžičnih zankastih omrežjih. Usmerjanje z odkrivanjem kodirnih priložnosti v omrežju in njihovim upoštevanjem pri izbiri poti imenujemo usmerjanje z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja (Iqbal, Dai, Huang, Hassan, & Yu, 2011). Z ustvarjanjem dodatnih kodirnih priložnosti lahko takšno usmerjanje omogoča večjo prepustnost omrežja v primerjavi z usmerjanjem brez zavedanja in upoštevanja lastnosti omrežnega kodiranja (angl. coding-unaware routing). Pri izbiri poti z več kodirnimi priložnostmi teži usmerjanje z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja k združevanju prometnih tokov. Prometni tokovi potekajo preko istih poti, zato je pri izbiri poti potrebno upoštevati tudi stopnjo prometne obremenitve na teh poteh. S tem se izognemo pojavu zasičenja omrežja. V brezžičnih omrežjih velika gostota prometa ne vodi le v zasičenje omrežja, temveč tudi v povečano interferenco med vozlišči zaradi povečanja delovnega cikla vozlišč, ki se nahajajo znotraj skupnega področja pokrivanja (Iqbal, Dai, Huang, Hassan, & Yu, 2011).

Obstoječe usmerjevalne sheme za omrežno kodiranje temeljijo na konceptu reaktivnega usmerjanja. Na podlagi informacije o topologiji omrežja in trenutnega prometa v omrežju stremijo k iskanju poti z več priložnostmi za kodiranje. V disertaciji smo raziskovali potencialne koristi upoštevanja uporabe omrežnega kodiranja v omrežju

na podlagi proaktivnega usmerjanja, kjer obstoječih usmerjevalnih shem za omrežno kodiranje ne moremo uporabiti.

V splošnem se v poljubnem omrežju, kjer so prisotni nehomogeni prometni tokovi, dobro kodira le manjši delež prometa, medtem ko se ostali promet slabo kodira, kljub uporabi usmerjanja z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja. S terminom dobro kodiran promet označujemo prometne tokove, katerih paketi se pogosto kodirajo na posameznem vozlišču. Za takšen promet pravimo, da ima visoko stopnjo uspešnosti pri kodiranju. S terminom slabo ali slabše kodiran promet pa označujemo prometne tokove, katerih paketi se ne kodirajo ali se redko kodirajo na posameznem vozlišču, zato pravimo, da imajo nizko stopnjo uspešnosti pri kodiranju. Zaradi omejene pasovne širine vozlišč ter omejenih čakalnih vrst vozlišč slabo kodiran promet na vozliščih preprečuje dobro kodiranemu prometu, da bi se kodiral še bolje. Zlasti je to opazno v območjih omrežja pod veliko obremenitvijo prometa in zasičenih območjih, kot so ozka grla. V disertaciji smo upoštevali našteta dejstva in razvili etapno proaktivno usmerjanje za promet tipa uporabniškega datagramskega protokola (UDP), ki združuje zavedanje in upoštevanje uporabe omrežnega kodiranja ter izogibanje prometnemu zasičenju v omrežju z namenom povečanja celotne prepustnosti v brezžičnih zankastih omrežjih. V okviru slednjega predlagamo nov dinamičen porazdeljen proaktivni usmerjevalni postopek na osnovi stanja povezav, imenovan usmerjanje za preprečevanje zasičenja z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja (angl. Congestion-Avoidance Network Coding-Aware Routing, CANCAR). Ta upošteva prometno obremenitev (gostoto/intenziteto prometa) in informacijo o izmerjeni uspešnosti kodiranja prometa za preusmeritev dela najslabše kodiranega prometa iz ozkih grl v primeru visoke gostote prometa v omrežju.

1.1 Prispevki doktorske disertacije

Doktorska disertacija obravnava problematiko dinamičnega usmerjanja paketov z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja v brezžičnih zankastih omrežjih za povečanje učinkovitosti rabe omrežnega kodiranja (v omrežnem sloju), ki povečuje prepustnost omrežja in s tem dodatno izboljšuje delovanje omrežja. V sklopu problematike je bil cilj raziskav zasnova usmerjevalnega postopka, ki upošteva, da se promet v omrežju različno dobro kodira. Med drugim se razviti postopek zaveda omejitev omrežja, kot so dinamika omrežne topologije, medsebojna interferenca med vozlišči in prometna obremenitev.

Izvirni prispevki doktorske disertacije k znanosti so:

1. Vpeljava novega koncepta usmerjanja, ki združuje zavedanje in upoštevanje lastnosti omrežnega kodiranja ter izogibanje zasičenju na podlagi informacije o uspešnosti pri kodiranju. Koncept je prikazan na reprezentativnem scenariju.
2. Zasnova, implementacija in ovrednotenje novega robustnega porazdeljenega proaktivnega usmerjevalnega postopka za izogibanje nasičenju na osnovi stanja povezav z majhnimi dodatnimi režijskimi stroški, ki upošteva prometno obremenitev in izmerjeno informacijo o uspešnosti kodiranja posameznih prometnih tokov na vozliščih v brezžičnih zankastih omrežjih.
3. Potrditev, da preusmeritev slabo kodiranih prometnih tokov stran od ozkih grl v omrežju lahko poveča uspešnost pri kodiranju na razbremenjenih vozliščih kot tudi ustvari nove priložnosti za kodiranje preusmerjenih prometnih tokov na alternativnih poteh v različnih topologijah omrežja.

Prispevki v doktorski disertaciji, ki so tudi pomembni za raziskovalce na ožjem področju, so:

1. Analiza obstoječih rešitev s področja dinamičnega usmerjanja z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja v brezžičnih omrežjih. Izvedli smo kritično oceno obstoječih rešitev ter predlagali zasnovo rešitve, ki smo jo v podrobnejših raziskavah nadgradili.
2. Predlagan model uspešnosti paketnega prenosa preko brezžičnih povezav v brezžičnih zankastih omrežjih za upoštevanje dinamičnega izgubnega brezžičnega okolja na nivoju omrežja, ki odraža izgube na omrežnem sloju v obliki verjetnosti uspešnega prenosa paketov.

3. Zasnovan simulacijski model za implementacijo in ovrednotenje delovanja novih postopkov za dinamično usmerjanje z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja v brezžičnih omrežjih.

Prispevki in rezultati doktorske disertacije bodo prispevali k raziskavam in razvoju novih metod, modelov, postopkov in algoritmov, ki bodo uporabni pri izgradnji brezžičnih sistemov naslednje generacije z uporabo tehnik omrežnega kodiranja. Omogočili bodo povečanje prepustnosti in učinkovitosti delovanja brezžičnih omrežij z razpršenim načinom delovanja.

1.2 Struktura doktorske disertacije

Doktorska disertacija je osredotočena na analizo usmerjevalnih postopkov v kombinaciji s postopki omrežnega kodiranja v brezžičnih zankastih omrežjih preko teoretičnih in numeričnih raziskav.

V drugem poglavju predstavimo osnove omrežnega kodiranja s poudarkom na priložnostnem omrežnem kodiranju za brezžična zankasta omrežja. S pomočjo enostavnih omrežnih topologij prikažemo prednosti uporabe omrežnega kodiranja. Opišemo uveljavljen omrežno kodirni postopek COPE, ki ga uporabimo tudi kot osnovo v razvitem novem usmerjevalnem postopku CANCAR. Nadalje predstavimo osnove dinamičnega usmerjanja. Opišemo funkcije usmerjanja in predstavimo usmerjevalne protokole, algoritme, metrike ter tipe usmerjanja, relevantne za usmerjanje z upoštevanjem uporabe omrežnega kodiranja v brezžičnih zankastih omrežjih. Na koncu poglavja predstavimo značilnosti usmerjanja, ki se zaveda uporabe omrežnega kodiranja v omrežju. Podobno kot za omrežno kodiranje prikažemo prednosti uporabe usmerjanja za omrežno kodiranje s pomočjo enostavnih omrežnih topologij in opravimo pregled obstoječih rešitev s področja dinamičnega usmerjanja za delovanje v povezavi z omrežnim kodiranjem v brezžičnih zankastih omrežjih. Poudarek je na kasnejši umestitvi predlaganega novega postopka glede na obstoječe rešitve.

Glavni del doktorskega dela predstavlja tretje poglavje. V tem poglavju najprej predstavimo koncept usmerjanja, na katerem temelji predlagani postopek. V tem delu se posvetimo teoretičnemu pristopu k problemu predlaganega usmerjanja z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja in izogibanju zasičenja. Opišemo in prikažemo koristnost uporabe izbranega pristopa k obravnavanemu problemu s pomočjo manjše enostavne topologije omrežja. Po teoretični obravnavi problema predstavimo razvit in predlagan postopek usmerjanja z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti uporabe omrežnega kodiranja, imenovan CANCAR, ki je jedro doktorske disertacije in glavni prispevek predstavljenega dela. Predstavljena je ideja predlaganega postopka in umestitev postopka med obstoječe tipe usmerjanja na področju telekomunikacijskih omrežij. Podani so vsi uporabljeni usmerjevalni postopki in opisana je njihova prilagoditev za potrebe funkcionalnosti v razvitem postopku. Opisan je postopek zbiranja in distribucije informacije, potrebne za usmerjanje, izračun ter določitev najkrajših poti in izračun ter izbira alternativnih poti za uspešno usmerjanje z zavedanjem omrežnega kodiranja. Posebej je predstavljen algoritem za izbiro alternativnih poti, ki se na podlagi različnih informacij in upoštevanja uporabe omrežnega kodiranja odloča o izbiri alternativne poti pred najkrajšo potjo, določeno s pomočjo klasičnega usmerjanja brez zavedanja uporabe omrežnega kodiranja v omrežju. Na koncu poglavja ovrednotimo obseg signalizacije za predlagano usmerjanje in ga primerjamo z obsegom signalizacije, potrebne za klasično usmerjanje.

V četrtem poglavju predstavimo simulacijski model za omrežno kodiranje v brezžičnih zankastih omrežjih, ki deluje na nivoju paketov. Model je sestavljen iz štirih glavnih modulov, ki zajemajo glavne funkcionalnosti, potrebne za analizo predlaganega usmerjevalnega postopka. Opisan je simulacijski cikel za avtomatsko pripravo in izvedbo simulacij ter analizo rezultatov. Predstavljen je tudi izviren model uspešnosti paketnega prenosa preko brezžičnih povezav za brezžična zankasta omrežja, ki smo ga razvili za potrebe računsko intenzivnih simulacij omrežnega kodiranja z velikimi prometnimi obremenitvami v omrežju.

V petem poglavju ovrednotimo predlagani usmerjevalni postopek CANCAR. Najprej so predstavljeni v simulacijah uporabljeni parametri, nato sledi predstavitev rezultatov simulacij. Poglavje je naprej razdeljeno na predstavitev rezultatov iz manjše referenčne omrežne topologije, ki je uporabljena v tretjem poglavju za razlago koncepta predlaganega

usmerjanja. S tem želimo potrditi teoretična dognanja predlaganega koncepta in postopka preko simulacijskih rezultatov. Drugi del simulacijskih rezultatov sestavljajo rezultati za različne prometne obremenitve in porazdelitve tokov v sintetično generiranih omrežnih topologijah. Učinkovitost usmerjanja ovrednotimo na podlagi doseženega prometnega pretoka, kodirnega dobitka vozlišč, števila kodiranih paketov, kodirnih priložnosti v prometnih tokovih in kodirnih priložnosti na vozliščih. Prometni pretok je pomemben s stališča boljšega in učinkovitejšega delovanja omrežja s pomočjo predlaganega usmerjevalnega postopka, medtem ko so ostali rezultati pomembni s stališča uspešnosti izkoriščanja omrežno kodirnega postopka v povezavi s predlaganim usmerjanjem.
V šestem poglavju podamo zaključke doktorske disertacije s poudarkom na izvirnih prispevkih in smernicah za nadaljnje delo.

Poglavje 2

Omrežno kodiranje in usmerjanje v brezžičnih zankastih omrežjih

Z uvajanjem novih storitev in tehnologij v dostopovnem segmentu brezžičnih omrežij se nenehno povečujejo tudi potrebe po večjih prenosnih zmogljivostih oziroma večji propustnosti prometa. Na prepustnost prometa vpliva tudi kvaliteta prenosnih povezav. Posledica preobremenjenih povezav je zmanjšanje prepustnosti ali celo zasičenje omrežja ter posledično povečanje prometnih zakasnitev in poslabšanje kakovosti storitev. Za povečanje prepustnosti omrežja so bile razvite različne tehnike, med katerimi sta tudi omrežno kodiranje in adaptivno usmerjanje. S pojavom novih tehnik in postopkov upravljanja s prenosnimi viri se v telekomunikacijah vedno znova pojavlja problem medsebojnega vpliva novih in obstoječih postopkov. Na nivoju uporabe omrežnih prenosnih virov je s tega stališča pogosto potrebno prilagoditi že obstoječe postopke za čim večjo izkoriščenost na novo uvedenih postopkov v omrežje. V okviru slednjega so se pojavile raziskave delovanja omrežnega kodiranja v povezavi z dinamičnim usmerjanjem kot uveljavljenim usmerjevalnim postopkom v naprednih telekomunikacijskih omrežjih. Namen je razviti in predlagati izboljšave obstoječih ali zasnovo novih dinamičnih usmerjevalnih postopkov za povečanje učinkovitosti uporabe omrežnega kodiranja in s tem zagotavljanja večje prepustnosti ter manjših zakasnitev v brezžičnih omrežjih.

2.1 Omrežno kodiranje

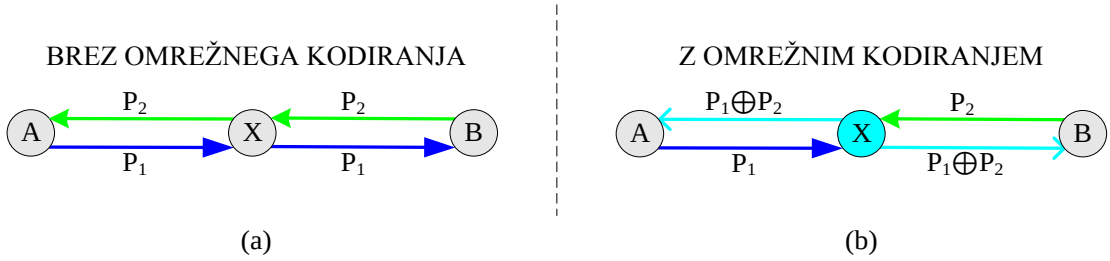
Omrežno kodiranje je tehnika za izboljšanje delovanja tako žičnega kot brezžičnega omrežja, zato se ji v zadnjih letih na znanstvenem področju posveča veliko pozornosti. Omrežno kodiranje se lahko uporablja za različne namene v različnih slojih modela OSI. Ena izmed uporab omrežnega kodiranja je v omrežnem sloju, kjer ga lahko med drugim uporabimo tudi za povečanje prepustnosti in/ali zmanjšanje zakasnitev v brezžičnem omrežju z razpršenim načinom delovanja pri večjih prometnih obremenitvah ali zasičenju.

2.1.1 Osnove priložnostnega omrežnega kodiranja

Omrežno kodiranje je mehanizem, ki so ga sprva predlagali za kodiranje več paketov skupaj bodisi iz istega ali različnih prometnih tokov z namenom povečanja pretoka v omrežju (Ahlswede, Cai, Li, & Yeung, 2000). V prvem primeru ga imenujemo omrežno kodiranje znotraj seje (angl. intra-session network coding), medtem ko ga v drugem primeru imenujemo omrežno kodiranje med sejami (angl. inter-session network coding). V nadaljevanju se bomo ukvarjali izključno z omrežnim kodiranjem med sejami, ki priložnostno kodira pakete različnih prometnih tokov. Za potrebe doktorske disertacije lahko predpostavimo, da uporabimo način omrežnega kodiranja, kjer se kodiranje in dekodiranje paketov opravi s pomočjo ene same linearne »izključno ali« operacije (z oznako XOR in simbolom $\oplus$).

V splošnem lahko prikažemo principe priložnostnega omrežnega kodiranja s pomočjo osnovnih enostavnih mrež. Najosnovnejši princip se lahko prikaže s pomočjo primera, poznanega kot izmenjava paketov med »Alice«, predstavljene z vozliščem A, in »Bob«, predstavljenega z vozliščem B, preko relejnega vozlišča, predstavljenega z vozliščem X. Opisana situacija je prikazana na sliki 2.1. Vozlišče A mora dostaviti paket P_1 vozlišču B

skozi vozlišče X in vozlišče B mora dostaviti paket P_2 vozlišču A skozi vozlišče X. Brez uporabe omrežnega kodiranja so potrebni štirje prenosi za dostavo paketov P_1 in P_2 do ponorov: dva prenosa za pošiljanje paketov do vozlišča X in dva prenosa za posredovanje paketov iz vozlišča X do njunih ponorov. Prenose lahko zapišemo kot $(A \rightarrow X)_1$, $(B \rightarrow X)_2$, $(X \rightarrow A)_1$ in $(X \rightarrow B)_2$, kjer pomeni na primer $(A \rightarrow X)_1$ prenos paketa P_1 iz vozlišča A v vozlišče X. Z uporabo omrežnega kodiranja so za dostavo istih paketov potrebni le trije prenosi: dva prenosa za pošiljanje paketov do vozlišča X in en prenos za posredovanje kodiranega paketa iz vozlišča X do ponorov. Prenose lahko spet zapišemo kot $(A \rightarrow X)_1$, $(B \rightarrow X)_2$ in $(X \rightarrow A \text{ in } X \rightarrow B)_{1\oplus 2}$. Vozlišče X potrebuje le en prenos za dostavo paketov, ker namesto, da posreduje oba paketa ločeno, kodira oba paketa P_1 in P_2 v en sam kodiran paket $P_1 \oplus P_2$ in slednjega pošlje do obeh ponorov, kar lahko označimo kot prenos $(X \rightarrow A \text{ in } X \rightarrow B)_{1\oplus 2}$. Ker vozlišče A pozna informacijo o paketu P_1, lahko dekodira informacijo o paketu P_2 iz kodiranega paketa $P_1 \oplus P_2$. Podobno pozna vozlišče B informacijo o paketu P_2 in lahko dekodira informacijo o paketu P_1 iz kodiranega paketa $P_1 \oplus P_2$. Vidimo, da v opisanem primeru ob uporabi omrežnega kodiranja zmanjšamo potrebno število prenosov za en prenos, kar predstavlja zmanjšanje vseh potrebnih prenosov za četrtino.

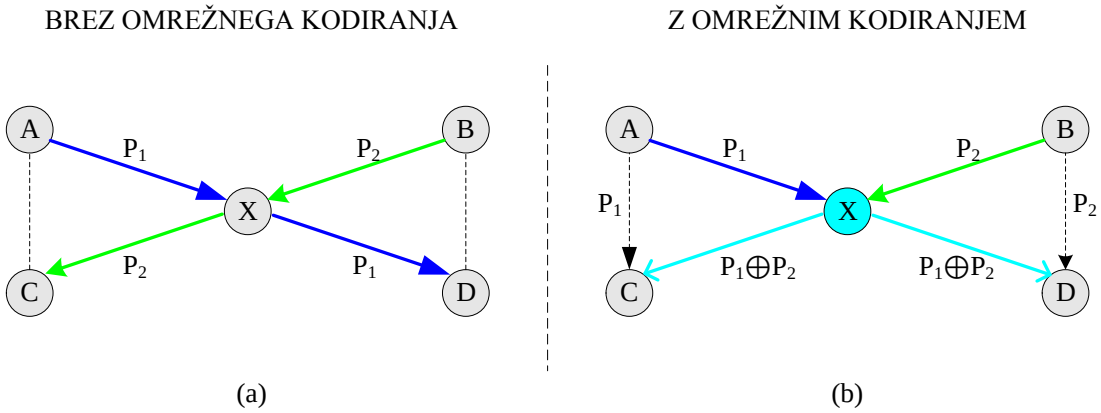


Slika 2.1: Prenos paketov preko posrednika brez priložnostnega prestrezanja: (a) brez uporabe omrežnega kodiranja, (b) z omrežnim kodiranjem.

2.1.2 Omrežno kodiranje v brezžičnih zankastih omrežjih

V brezžičnih zankastih omrežjih lahko omrežno kodiranje izkorišča naravo razpršenega oddajanja v brezžičnem zračnem prostoru, zaradi katerega pride do dodatnih priložnosti za kodiranje. Vsa vozlišča delujejo na isti nosilni frekvenci in tako uporabljajo isti frekvenčni pas s pomočjo časovnega multipleksiranja. Na takšen način lahko vozlišča prestrežejo pakete, ki niso namenjeni njim, temveč njihovim sosedom. To omogoča pojav dodatnih priložnosti za kodiranje, saj s pomočjo teh paketov lahko vozlišča kodirajo več paketov skupaj. Opisano lahko predstavimo s pomočjo primera na sliki 2.2, ki je znan kot primer v topologiji »X« (Katti, Rahul, Hu, Katabi, Médard, & Crowcroft, 2008).

Vozlišče A mora dostaviti paket P_1 vozlišču D preko posredniškega vozlišča X in vozlišče B mora dostaviti paket P_2 vozlišču C preko posredniškega vozlišča X. Brez uporabe omrežnega kodiranja so potrebni štirje prenosi za dostavo obeh paketov: dva prenosa za pošiljanje paketov iz izvornih vozlišč (A in B) do vozlišča X in dva prenosa za posredovanje paketov iz vozlišča X do njunih ciljnih vozlišč (C in D), kar označimo kot $(A \rightarrow X)_1$, $(B \rightarrow X)_2$, $(X \rightarrow D)_1$ in $(X \rightarrow C)_2$. Z uporabo omrežnega kodiranja so za dostavo istih paketov potrebni le trije prenosi: dva prenosa za pošiljanje paketov iz izvornih vozlišč do vozliča X in en prenos za posredovanje kodiranega paketa iz vozlišča X do ciljnih vozlišč, kar označimo kot $(A \rightarrow X)_1$, $(B \rightarrow X)_2$, $(X \rightarrow D \text{ in } X \rightarrow C)_{1\oplus 2}$. Vozlišče X kodira oba paketa P_1 and P_2 v en sam kodiran paket $P_1 \oplus P_2$ in ga posreduje naprej. Po sprejemu kodiranega paketa $P_1 \oplus P_2$ lahko vozlišče C izlušči informacijo o paketu P_2 iz paketa $P_1 \oplus P_2$, saj je vozlišče C že pred tem prestreglo paket P_1 iz vozlišča A. Podobno lahko vozlišče D izlušči informacijo o paketu P_1 iz paketa $P_1 \oplus P_2$, saj je prestreglo paket P_2 iz vozlišča B. Z omrežnim kodiranjem torej privarčujemo za četrtino prenosov v danem primeru. Na prikazan način lahko s pomočjo prestrezanja paketov sosedov ustvarimo nove priložnosti za kodiranje v brezžičnih zankastih omrežjih, kar se v primeru žičnih povezav ne zgodi.



Slika 2.2: Prenos paketov preko posrednika s priložnostnim prestrezanjem: (a) brez uporabe omrežnega kodiranja, (b) z omrežnim kodiranjem.

2.1.3 Omrežno kodirni postopek COPE

Postopek COPE je dobro poznan praktičen omrežno kodirni postopek za priložnostno kodiranje v brezžičnih omrežjih, ki se ga pogosto omenja ter raziskuje v obstoječi literaturi. Postopek spada med omrežno kodirne postopke med sejami. Predlagan je bil v (Katti, Rahul, Hu, Katabi, Médard, & Crowcroft, 2008) kot neodvisen podsloj med slojem za krmiljenje dostopa do medija (MAC) in omrežnim slojem. Postopek COPE priložnostno kodira po dva ali več paketov iz različnih prometnih tokov v en sam paket za enojen prenos več paketov hkrati. Pakete kodira enoetapno do naslednjega vozlišča na poti, kjer se paketi dekodirajo. Kodiranje poteka na podlagi informacije vozlišč o tem, katere pakete imajo njihovi sosedje. Upošteva vse kodirne scenarije, prikazane v poglavjih 2.1.1 in 2.1.2, zato lahko dosega znatno povečanje prepustnosti omrežja, kot je ugotovljeno tudi v (Katti, Rahul, Hu, Katabi, Médard, & Crowcroft, 2008) na podlagi rezultatov iz realnega testnega okolja. Poleg zagotavljanja večje prepustnosti omrežja pri nepovečani paketni zakasnitvi je prednost postopka COPE, da vsebuje mehanizme za visoko stopnjo uspešnosti pri dekodiranju paketov; v primeru idealnih brezžičnih povezav uspe dekodirati vse pakete.

2.1.3.1 Opis postopka pri oddaji paketov

Postopek COPE je zasnovan na ideji, da vozlišče namenoma ne zakasnjuje paketov za ustvarjanje kodirnih priložnosti, zato COPE praktično ne povzroča dodatnih zakasnitev. Vozlišča uporabljajo pri postopku COPE čakalne vrste tipa »prvi noter, prvi ven« (tip FIFO). Za proces kodiranja se vedno vzame paket, ki je na čelu čakalne vrste. Algoritem kodiranja gre skozi ostale pakete v čakalni vrsti in išče pakete, ki bi se lahko kodirali s prvim paketom. V primeru, da trenutno ni takšnih paketov v čakalni vrsti, vozlišče pošlje nekodiran paket. Na takšen način se paket na čelu vrste pošlje vedno ob predvidenem času in brez dodatnih zakasnitev. V primeru priložnosti za kodiranje se preko procesa kodiranja paketu na čelu vrste dodajo ustrezni paketi. V tem primeru se dodani paketi pošljejo iz vozlišča predčasno.

Proces kodiranja je odvisen od informacije, ki je na razpolago vozliščem o tem, katere pakete imajo njihovi sosedje. Vozlišča pridobijo to informacijo s pomočjo prestrezanja običajnih paketov od sosedov in preko posebnih nadzornih paketov od sosedov (angl. special control packets), saj se ti pošiljajo z razpršenim oddajanjem. Posebni nadzorni paketi vsebujejo sosedovo poročilo o prejetih paketih (angl. reception reports) in sosedovo kumulativno potrditveno poročilo (angl. cumulative ACK report). Sosedovo poročilo o prejetih paketih vsebuje informacijo o tem, katere pakete ima shranjene sosed. Sosedovo kumulativno potrditveno poročilo vsebuje informacijo o potrditvah uspešno prejetih paketov pri sosedu (ACK-ih). Posebni nadzorni paketi se pošiljajo periodično, razen v primeru, ko obstaja priložnost, da se informacijo v obeh poročilih pripne k običajnim paketom, ki se jih pošilja iz vozlišča. V primeru, da vozlišča imajo informacijo o

tem, katere pakete imajo sosedje, je postopek kodiranja jasen in paketi se bodo pri procesu dekodiranja rekonstruirali z visoko stopnjo uspešnosti.

Informacija vozlišč o razpoložljivosti paketov pri sosedih, ki je pridobljena preko posebnih nadzornih paketov in s pomočjo prestrezanja vseh sporočil (poslanih z razpršenim oddajanjem), ni zadostna za učinkovit proces kodiranja in dovoljuje le malo priložnosti za kodiranje. V primeru, da vozlišče nima informacije o razpoložljivosti paketa pri določenem sosedu, mora pri procesu kodiranja ugibati o nastalem položaju. Proces ugibanja temelji na informaciji o verjetnosti uspešnega prenosa na posamezni brezžični povezavi. Ta informacija je običajno prisotna pri dinamičnih usmerjevalnih protokolih za brezžična zankasta omrežja in se uporablja za izračun metrike ETX (Iqbal, Dai, Huang, Hassan, & Yu, 2011) ali podobne metrike. Vozlišče oceni verjetnost, da ima vozlišče A paket P tako, da pogleda verjetnost uspešnega prenosa na brezžični povezavi med vozliščem, od kjer je paket P prišel, ter vozliščem A.

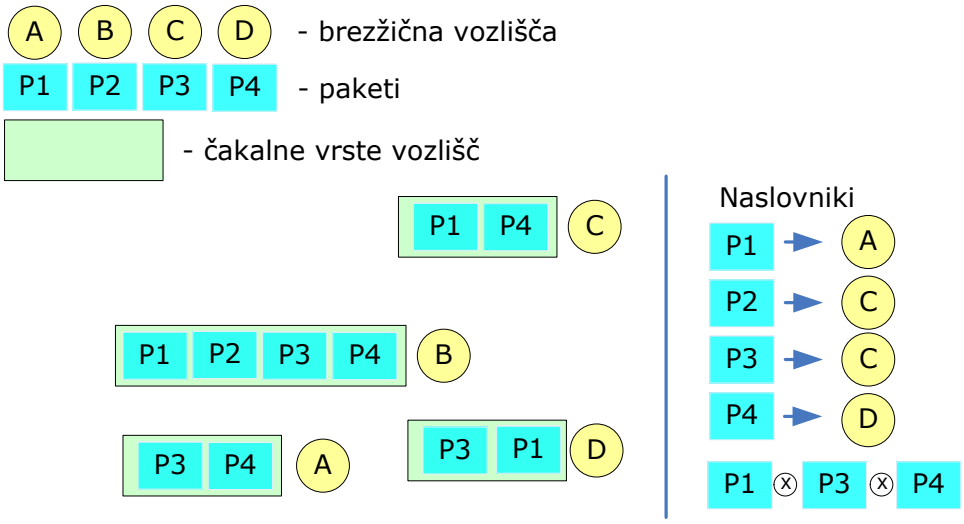
S pomočjo zgornje informacije lahko vozlišče kodira skupaj toliko paketov, kot je le mogoče, pri čemer:

(i) nobeden od kodiranih paketov ne sme biti ustvarjen na tem vozlišču;
(ii) vsi od kodiranih paketov so posredovani različnim sosedom (kar pomeni, da imajo tudi različne ponore) in
(iii) obstaja velika verjetnost (ki jo določimo s pomočjo informacije o verjetnosti uspešnega prenosa na posamezni brezžični povezavi), da bo vsak prejemnik kodiranega paketa (torej vsi sosedje, ki jim je namenjen kodirani paket) zmožen dekodirati paket. Prejemnik kodiranega paketa lahko dekodira paket, če je pred sprejemom kodiranega paketa že prejel vse pakete v kodiranem paketu, razen tistega, ki mu je namenjen.

Vsako vozlišče shrani vse sprejete (tudi prestrežene) pakete, ki jih je možno dekodirati. Paketi se kodirajo enoetapno, torej samo za čas prenosa med dvema vozliščema. Po enem skoku med vozliščema se kodirani paketi dekodirajo in nadalje obdelajo. Preden se pakete ponovno pošlje iz vozlišča, poskuša vozlišče najti nove priložnosti za kodiranje. Vozlišča shranijo vse izvorne pakete v poseben zbir paketov (angl. packet pool) in jih kasneje po potrebi uporabijo pri procesu dekodiranja. Pri procesu kodiranja se poskuša kodirati čim več paketov skupaj. Operacija, ki se jo uporabi za kodiranje paketov, je linearna operacija XOR ali $\oplus$.

2.1.3.1.1 Prikaz delovanja algoritma kodiranja Ko posamezen paket prispe na čelo izhodne čakalne vrste, vozlišče pregleda celotno čakalno vrsto s pomočjo kodirnega algoritma, če so mogoče zadaj v vrsti paketi, ki se lahko kodirajo s paketom na čelu vrste. Slika 2.3 (Katti, Rahul, Hu, Katabi, Médard, & Crowcroft, 2008) prikazuje delovanje kodirnega algoritma, ki je zadolžen za določanje, kateri paketi se bodo kodirali skupaj pri procesu kodiranja.

Na sliki je prikazano stanje na danem vozlišču, ki je zadolženo za posredovanje paketov svojim sosednjim vozliščem. Oznake A, B, C in D predstavljajo sosednja brezžična vozlišča, oznake P_1, P_2, P_3, in P_4 predstavljajo pakete na sosednjih brezžičnih vozliščih in pravokotniki predstavljajo čakalne vrste sosednjih brezžičnih vozlišč. V prikazanem primeru mora dano vozlišče dostaviti paket P_1 vozlišču A, paketa P_2 in P_3 vozlišču C ter paket P_4 vozlišču D, kot prikazano desno na sliki. Paket P_1 je prvi v čakalni vrsti danega vozlišča. Postopek COPE poskuša kodirati čim več paketov s paketom P_1. Zato bo v predstavljeni situaciji postopek COPE kodiral skupaj tri pakete na danem vozlišču, in sicer P_1, P_3 in P_4: $P_1 \oplus P_3 \oplus P_4$. Po prejetem kodiranem paketu $P_1 \oplus P_3 \oplus P_4$ lahko vozlišče A dekodira paket P_1 s pomočjo paketov P_3 in P_4, vozlišče C lahko dekodira paket P_3 s pomočjo paketov P_1 in P_4, ter vozlišče D lahko dekodira paket P_4 s pomočjo paketov P_1 in P_3. S pomočjo uporabe kodirnega algoritma posredujemo iz danega vozlišča pakete P_1, P_2 in P_4 v prvem prenosu, paket P_3 pa v drugem, kar predstavlja zmanjšanje vseh potrebnih prenosov za polovico v primerjavi s prenosom paketov brez uporabe kodirnega algoritma.



Slika 2.3: Ponazoritev delovanje kodirnega algoritma COPE.

2.1.3.2 Opis postopka pri sprejemu paketov

Ko vozlišče prejme kodirani paket, ga poskuša dekodirati s pomočjo že prej prejetih paketov. Če se paket lahko dekodira, je nadaljnji proces enostaven. V primeru, da je vozlišče prejemnik enega od paketov v kodiranem paketu, se ta paket pošlje višje ležečim slojem. Drugače se paket le shrani v zbir paketov za kasnejšo uporabo pri procesu dekodiranja. Za uspešno dekodirane pakete, v katerih je en izmed paketov namenjen vozlišču, se pošlje pošiljatelju paketov potrditev o uspešno prejetem paketu (ACK) (tukaj je govora o potrditvah v omrežno kodirnem postopku). Potrditve o uspešno prejetih paketih se ne pošilja za vsak uspešno prejet in dekodiran paket, namenjen vozlišču, temveč se potrditve za več paketov zbere skupaj in pošlje pošiljatelju paketov v enem sporočilu, imenovanem kumulativno potrditveno poročilo. Ta poročila se samostojno periodično (na določen kratki časovni interval) pošilja v posebnih nadzornih paketih z razpršenim načinom oddajanja ali pa se jih v primeru, da se pojavi priložnost, pripne k paketom, ki se jih pošilja iz vozlišča. V zadnjem primeru se jih lahko smatra le kot dodatno glavo v paketu, kar povzroči manjše režijske stroške za pošiljanje teh poročil.

Če kodiranega paketa ni mogoče dekodirati, je nadaljnji proces odvisen od tega, ali je vozlišče prejemnik enega od paketov v kodiranem paketu. V primeru, da vozlišče ni prejemnik enega od paketov, potem se kodirani paket enostavno zavrže. Drugače se kodirani paket shrani v zbir neuspešno dekodiranih paketov.

V kolikor pošiljatelj ne prejme potrditve o uspešno prejetem in dekodiranem paketu za enega izmed paketov, poslanih v kodiranem paketu, znotraj določenega časovnega intervala, se za ta paket ponovi pošiljanje (angl. retransmission). Izbran paket je postavljen na čelo čakalne vrste, od koder se ga prednostno pošlje pred ostalimi paketi s čim manjšo zakasnitvijo. Za ta paket se ponovno poišče priložnosti za kodiranje, zato se lahko paket pošlje iz vozlišča ponovno kodiran. Pošiljanje paketa se v omrežno kodirnem sloju ponovi le dvakrat, nato se paket zavrže. Vsak od prejemnikov kodiranega paketa mora biti sposoben dekodirati kodirani paket. S tem pridobi informacijo o enem izmed izvornih paketov v kodiranem paketu.

Ko vozlišče prejme izvorni paket, ga vedno shrani v zbir paketov ne glede na to, ali je vozlišče prejemnik paketa ali ne. Nato vozlišče pogleda v zbir neuspešno dekodiranih paketov, ali lahko na novo pridobljena informacija pomaga pri dekodiranju kakšnega od neuspešno dekodiranih paketov. V primeru, da je vozlišče prejemnik paketa, se paket pošlje višje ležečim slojem, kjer je nadalje obdelan.

Za postopek COPE je bilo tudi razvito psevdo razpršeno pošiljanje (angl. pseudo broadcast), ki je predstavljeno v poglavju 4.1.4. Mehanizem omogoča pošiljanje paketov z načinom oddajanja enemu sprejemniku kljub temu, da so kodirani paketi namenjeni več sprejemnikom in bi zato potrebovali mehanizem za razpršeno pošiljanje.

2.2 Dinamično usmerjanje

Funkcionalnost usmerjanja igra ključno vlogo pri povezovanju oddaljenih vozlišč in posredovanju paketov v posameznih prometnih tokovih v komunikacijskih omrežjih. Usmerjanje poteka na omrežnem sloju modela OSI. Zadolženo je za usmerjanje paketov skozi omrežje, od izvora do ponora. Za vsak paket je potrebno določiti optimalno pot na podlagi želenih in izbranih kriterijev. Uporaba dinamičnega usmerjanja nadalje omogoča, da se lahko usmerjanje uspešno odziva na spremembe v omrežju. V brezžičnih omrežjih je dinamična izbira poti pomembna, saj so razmere v brezžičnem mediju zelo spremenljive. Odvisne so od različnih faktorjev, kot so izgube pri razširjanju signala na poti, senčenje, odboji, razširjanje po več poteh, interference med vozlišči itd. Dinamično usmerjanje v brezžičnih zankastih omrežjih je še posebej zapleteno zaradi številnih brezžičnih vozlišč, ki so med seboj povezana s številnimi brezžičnimi povezavami, zato moramo pri usmerjanju upoštevati njihov medsebojni vpliv, ki je težko predvidljiv. Tako kot z omrežnim kodiranjem lahko tudi z ustreznim dinamičnim usmerjanjem izboljšamo delovanje brezžičnega zankastega omrežja.

2.2.1 Funkcije usmerjanja

Usmerjanje v splošnem vsebuje štirih glavne funkcije (Pertovt, Alič, Mohorčič, & Švigelj, 2011): (i) zajem informacij o stanju v omrežju ter stanju prometa uporabnikov in izračunu cen povezav, (ii) distribucija zajete informacije po omrežju, (iii) izračun poti v skladu s stanjem prometa uporabnikov in izbranim optimizacijskim kriterijem in (iv) razpošiljanje ter posredovanje prometa uporabnikov po izračunanih poteh od izvora do ponora. Za vsako od navedenih usmerjevalnih funkcij obstajajo različni postopki. Izbira danega postopka vpliva v splošnem na: (i) uspešnost delovanja usmerjevalnega protokola in (ii) ceno/stroške delovanja protokola. Omenjena vidika sta si nasprotujoča, zato je cilj usmerjevalnega algoritma doseči ustrezno ravnovesje med obema.

2.2.2 Načini usmerjanja

Usmerjevalni protokoli uporabljajo različne usmerjevalne postopke za opravljanje funkcij usmerjanja. Glede na način izvrševanja usmerjevalnih funkcij delimo usmerjevalne protokole v različne skupine.

2.2.2.1 Statično in dinamično usmerjanje

V osnovi lahko usmerjanje delimo najprej na statično in dinamično usmerjanje. Pri statičnem usmerjanju se poti izračunajo vnaprej in se med delovanjem omrežja ne spreminjajo. Statično usmerjanje se ne odziva na spremenjene razmere ali padec povezav, izpad ali pojav novih vozlišč in povezav ter pojav drugih sprememb v omrežju. Zato se pri večjih spremembah razmer v omrežju običajno določijo nove poti ročno, kar povzroča velike izgube in zakasnitve zaradi poznega odziva na spremembe. Takšno usmerjanje je s stališča računske moči nezahtevno.

Pri dinamičnem usmerjanju se poti do neke mere prilagajajo razmeram v omrežju, tako da se na podlagi zbiranja informacij o omrežju samostojno izračunavajo nove poti med samim delovanjem omrežja. Spremembe pri usmerjanju so v primerjavi s statičnim usmerjanjem veliko hitrejše in učinkovitejše. Na račun večje odzivnosti je dinamično usmerjanje računsko potratnejše.

2.2.2.2 Centralizirano in porazdeljeno usmerjanje

Glede na lokacijo izvajanja izračuna poti delimo usmerjanje na centralizirano in porazdeljeno. Pri centraliziranem usmerjanju se poti izračunajo v enem samem centralnem vozlišču, ki mora poznati celotno informacijo o omrežju. Po izračunu poti pošlje centralno vozlišče izračunane usmerjevalne tabele do vsakega vozlišča v omrežju. V primeru izpada centralnega vozlišča se izračun poti v omrežju ne zgodi.

Pri porazdeljenem usmerjanju se izračun poti izvede na vsakem vozlišču posebej. Usmerjanje je zelo zanesljivo. Vsako vozlišče lahko zase izračuna usmerjevalno tabelo na podlagi poznavanja topologije in zbrane informacije o stanju v omrežju. Eden od problemov, ki se pojavi pri tej vrsti usmerjanja, je pojav zank v omrežju, saj lahko dve

vozlišči ob nekem trenutku določita, da je drugo vozlišče bliže ponoru paketa, zato pakete pošiljata drug drugemu, dokler se čez čas pri odločitvi ne poenotita.

2.2.2.3 Usmerjanje na podlagi stanja povezav in usmerjanje na podlagi vektorja razdalj

Glede na način zbiranja informacij o omrežju za izračun poti lahko usmerjanje delimo na usmerjanje na podlagi stanja povezav in usmerjanje na podlagi vektorja razdalj (Peterson & Davie, 2011). Pri usmerjanju na podlagi stanja povezav vzdržuje vsako vozlišče informacijo o stanju celotne topologije in ceni vseh povezav v omrežju. Vsako vozlišče zajema podatke o stanju povezav do vsakega od sosedov za določanje cene povezav. Te podatke vozlišče periodično razpošilja vsem vozliščem v omrežju. Na podlagi zbrane informacije lahko nato vsako vozlišče zase izračuna najkrajšo (oziroma najboljšo možno) pot do vsakega vozlišča v omrežju. Ko je potrebno poslati določen paket od izvora do ponora, lahko vsako vozlišče posreduje paket do naslednjega (sosednjega) vozlišča na podlagi predhodno izračunane najboljše možne poti. Ob spremembah v omrežju konvergira tovrstno usmerjanje zelo hitro, vendar potrebuje več pasovne širine za signalizacijo in več časa za izračun poti zaradi velikih zakasnitev pri razpošiljanju podatkov. Slednje povzročajo pojav kratkotrajnih zank, ki v najslabšem primeru trajajo toliko časa, dokler podatki za izračun poti ne prepotujejo razdalje, ki je enaka razdalji premera omrežja.

Pri usmerjanju na podlagi vektorja razdalj vzdržuje vsako vozlišče tabelo razdalj do vsakega vozlišča v omrežju. Poleg tega vzdržuje vsako vozlišče le informacijo o stanju cene povezav do vsakega od sosedov. Namesto razpošiljanja te informacije vsem vozliščem v omrežju, kot to počne usmerjanje na podlagi stanja povezav, vsako vozlišče periodično razpošilja tabelo razdalj le svojim sosedom. S pomočjo tabel razdalj od sosedov lahko vsako vozlišče posodobi vrednosti v svojih tabelah razdalj. Na podlagi primerjave razdalj v tabelah sosedov lahko nato vozlišče določi, preko katerega soseda vodi resnično prava najkrajša pot do ponora paketa. Od tu je postopek enak usmerjanju na podlagi stanja povezav. Ko se pojavi potreba po pošiljanju paketa, vsako vozlišče posreduje paket do ustreznega soseda. V primerjavi z usmerjanjem na podlagi stanja povezav je tovrstno usmerjanje računsko učinkovitejše, enostavnejše za implementacijo in potrebuje manj prostora za shranjevanje podatkov. Vendar lahko takšno usmerjanje povzroči pojav kratkotrajnih in dolgotrajnih zank. Glavni razlog za pojav zank je, da vozlišča izbirajo, kateremu sosedu posredovati pakete, na povsem porazdeljen način na podlagi informacij, ki so lahko zastarele.

2.2.2.4 Reaktivno in proaktivno usmerjanje

Usmerjanje lahko nadalje delimo glede na čas izračuna poti na usmerjanje na zahtevo ali reaktivno usmerjanje in usmerjanje na podlagi usmerjevalnih tabel ali proaktivno usmerjanje. Pri reaktivnem usmerjanju se poti izračunajo le po potrebi ob pojavu zahteve za usmerjanje novega prometnega toka v omrežju. Tako se vzdržujejo le tiste poti, po katerih trenutno poteka promet. S tem se izvede usmerjanje le ob pozivu izvorov prometnih tokov, tako da izvorno vozlišče pošlje zahtevek po informaciji o stanju v omrežju, ki preplavi omrežje. Reaktivno usmerjanje je predvsem primerno za povezavna paketna omrežja, v katerih se pred začetkom prenosa paketov vzpostavi navidezna povezava, ki zagotavlja določeno stopnjo kvalitete storitve. Ker se usmerjanje izvede le po potrebi, potrebujemo manj računske moči in imamo manj režijskih stroškov. Vendar se na drugi strani pojavijo dodatne zakasnitve paketov, saj proces iskanja poti zahteva določen čas pred dejanskim začetkom odpošiljanja paketov.

Pri proaktivnem usmerjanju se vse poti izračunavajo vnaprej in se konstantno vzdržujejo s pomočjo informacij o omrežju, ki si jih vozlišča konstantno izmenjujejo tako na lokalni kot na globalni ravni. Poti se izračunavajo periodično ali ob določenih spremembah stanja omrežja, zato so poti vnaprej znane in se jih lahko po potrebi takoj uporabi. To omogoča, da se pakete odpošlje iz vozlišča v trenutku zahteve po pošiljanju paketov brez dodatnih zakasnitev. Slaba lastnost proaktivnega usmerjanja je, da potrebuje določen čas za konvergiranje k stabilnemu stanju, kar lahko povzroča težave v primeru pogostih sprememb topologije omrežja. V primerjavi z reaktivnim usmerjanjem ima lahko proaktivno usmerjanje več režijskih stroškov, vendar se lahko v primeru pogostih in hitrih sprememb prometa v omrežju le-ti tudi pri uporabi reaktivnega usmerjanja močno povečajo.

2.2.2.5 Izvorno in etapno usmerjanje

Glede na način usmerjanja po poti lahko usmerjanje delimo na izvorno usmerjanje in etapno usmerjanje. Pri izvornem usmerjanju je za usmerjanje paketa preko omrežja v celoti odgovorno vozlišče, ki predstavlja izvor paketa. Preden se paket pošlje, izvorno vozlišče določi celotno pot, po kateri se bo paket poslal od izvora do ponora paketa. Vmesna vozlišča usmerjajo paket skozi omrežje po vnaprej določeni poti na podlagi informacije v glavi paketa, ki jo nastavi izvorno vozlišče. Ko paket prispe do enega izmed vmesnih vozlišč, vozlišče pogleda v glavo paketa, kjer je zapisano, kateremu sosedu mora vozlišče posredovati paket naprej. Izvorno usmerjanje potrebuje dodatne režijske stroške v vsakem poslanem paketu, ne obremenjuje pa vmesnih vozlišč. Slabost izvornega kodiranja je, da v primeru izpada določene povezave ali vozlišča paketov ni mogoče preusmeriti na druga vozlišča, dokler informacija o spremembi stanja omrežja ne doseže izvornega vozlišča, zato so izgube paketov zelo velike.

Pri etapnem usmerjanju vsebuje vsak paket v glavi le informacijo o izvornem in ponornem vozlišču. Na podlagi informacije o izvoru in ponoru paketa se lahko vsako vmesno vozlišče samostojno odloča o usmerjanju paketa preko omrežja s pomočjo vnaprej izračunane usmerjevalne tabele, ki se nahaja v vozlišču. Zato lahko v primeru izpada določene povezave ali vozlišča vmesno vozlišče preusmeri pakete na drugo vozlišče brez večjih izgub paketov.

2.2.2.6 Usmerjanje po eni poti in usmerjanje po več poteh

Glede na število poti, po katerih se pošilja pakete, ki pripadajo istemu prometnemu toku, ločimo med usmerjanjem po eni poti in usmerjanjem po več poteh. Kakor že samo ime pove, se pri usmerjanju po eni poti vsi paketi istega prometnega toka pošljejo po isti poti.

Pri usmerjanju po več poteh lahko nekaj paketov istega prometnega toka pošljemo po eni poti, nekaj paketov pa po drugi, alternativni poti. Za odpošiljanje po alternativni poti se lahko odločimo na podlagi izvornega vozlišča ali pa na podlagi trenutnega stanja v poljubnem vmesnem vozlišču.

2.2.3 Usmerjevalni protokoli

Usmerjanje prometa po omrežju izvajajo in nadzorujejo usmerjevalni protokoli. Večinoma so zadolženi za izbiro poti med različnimi izvori in ponori v omrežju in uspešno dostavo paketov od izvorov do ponorov v omrežnem sloju, kar ustreza usmerjevalnim funkcijam (i), (ii) in (iv), predstavljenim v poglavju 2.2.1. Poti se izračunajo s pomočjo usmerjevalnega algoritma na podlagi različnih usmerjevalnih metrik.

Med obstoječimi usmerjevalnimi protokoli za brezžična zankasta omrežja sta med bolj prepoznavnimi proaktiven protokol DSDV (Perkins & Bhagwat, Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers, 1993) in reaktiven protokol DSR (Johnson & Maltz, 1996). Zadnji postopek je bil uporabljen tudi kot temelj pri usmerjanju z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja v brezžičnih zankastih omrežjih. Protokol SRCR (Bicket, Aguayo, Biswas, & Morris, 2005) pa je bil uporabljen v kombinaciji z omrežno kodirnim postopkom COPE. Pri usmerjanju v povezavi z omrežnim kodiranjem v brezžičnih zankastih omrežjih sta bila uporabljena tudi poznana reaktivna protokola AODV (angl. Ad hoc On-demand Distance Vector) (Perkins & Royer, Ad-hoc on-demand distance vector routing, 1999) in OLSR (angl. Optimized Link State Routing) (Jacquet, Mühlethaler, Clausen, Laouiti, Qayyum, & Viennot, 2001). V nadaljevanju predstavimo protokol DSDV kot primer proaktivnega protokola, protokol DSR kot primer reaktivnega protokola in protokol SRCR, ki je bil uporabljen v kombinaciji s postopkom COPE.

2.2.3.1 DSDV protokol

Protokol DSDV (angl. Destination Sequenced Distance Vector) je dinamičen porazdeljen proaktiven protokol za oddajanje enemu prejemniku in temelji na Bellman-Fordovem usmerjevalnem algoritmu. Uporablja etapno usmerjanje na podlagi vektorja razdalj. Vozlišča periodično razpošiljajo usmerjevalne tabele preko celotnega omrežja za osveževanje informacij o stanju vozlišč in usmerjevalnih poti v omrežju. Na vsakem vozlišču se nahaja usmerjevalna tabela. V tabeli se nahaja po en vnos za vsako vozlišče (ponor) v omrežju. Vsak vnos v tabeli vsebuje informacijo o naslovu ponora, naslednje

vozlišče (eden od sosedov tega vozlišča) na poti do ponora, zadnjo sekvenčno številko, ki označuje zadnji sprejem informacije o tem ponoru, in metriko (ceno poti), potrebno za usmerjevalni algoritem.

Vsako vozlišče periodično (na primer vsakih 15 sekund) razpršeno pošlje vsakemu izmed sosedov zahtevek za oglaševanje poti (angl. route advertisement packet) (poznan kot polni zapis, angl. full dump) s celotno usmerjevalno tabelo. S pomočjo uporabe sekvenčnih številk se lahko razlikuje med starimi in na novo izračunanimi potmi. Tako se prepreči pojav zank v omrežju. Protokol DSDV vsebuje mehanizem časa prehoda in umirjanja (angl. settling time mechanism), ki preprečuje pošiljanje zahtevkov za oglaševanje usmerjevalnih poti po slabih poteh (to je poteh s slabo metriko). Uporablja tudi prožene posodobitve za hitro obveščanje (na primer enkrat na sekundo) sosedov o dobrih usmerjevalnih poteh. V teh se pošljejo le informacije o novih svežih vnosih usmerjevalnih poti v usmerjevalno tabelo. Prožena posodobitev je lahko v nekaterih primerih tudi polni zapis.

Glavna prednost protokola DSDV je sposobnost zagotavljanja usmerjevalnih poti brez možnosti pojava zank v omrežju, medtem ko je glavna slabost takšnega usmerjanja obseg signalizacije zaradi periodičnega razpršenega pošiljanja informacij za usmerjanje.

Pri uporabi protokola DSDV v kombinaciji z metriko ETX so potrebne določene prilagoditve, in sicer:

- način, kako se uporablja mehanizem časa prehoda in umirjanja,
- ne uporablja se mehanizem za pošiljanje povratne informacije na nivoju povezav (angl. link-level feedback) (na primer obvestila o neuspešnem prenosu pri standardu 802.11b) za detekcijo padcev povezav in tvorjenje sporočil o pretrganih usmerjevalnih poteh,
- ob proženih posodobitvah se nikoli ne pošlje polni zapis,
- na novo izračunane poti se nikoli ne uporabi, preden se jo uspe sporočiti naprej s pomočjo zahtevkov za oglaševanje poti; s tem se prepreči uporabo usmerjevalnih poti s slabo metriko, za to prilagoditev pa skrbi mehanizem časa prehoda in umirjanja.

2.2.3.2 Protokol DSR

Protokol DSR (angl. Dynamic Source Routing) je dinamičen porazdeljen reaktiven protokol, ki uporablja Dijkstrov usmerjevalni algoritem. Uporablja izvorno usmerjanje, ki izvaja izračun usmerjevalnih poti le v primeru, ko potrebuje vozlišče poslati paket. Pri pošiljanju paketov skozi omrežje odkriva poti v celoti s pomočjo informacije v glavi vsakega od podatkovnih paketov. Vsako vozlišče vzdržuje predpomnilnike usmerjevalnih poti (angl. route caches), kjer so shranjene informacije o poti (angl. route information) do ponorov.

Protokol DSR je sestavljen iz dveh faz. Prva faza se imenuje odkrivanje usmerjevalne poti, v kateri izvorno vozlišče razpršeno pošlje zahtevek za odkrivanje poti (angl. route request) s svojo izvorno usmerjevalno tabelo. Tabela vsebuje podatke o naslovu in ponoru izvora ter edinstveno identifikacijsko številko. Vsako vozlišče, ki sprejme zahtevek, mu doda svoj naslov in ga razpršeno pošlje naprej. Ko zahtevek doseže svoj ponor, se na ponoru generira paket odgovora (angl. route reply) o poti in pošlje nazaj po poti zahtevka do izvora zahtevka. Informacijo v paketu odgovora o poti uporabi nato usmerjevalni algoritem pri izbiri najboljše usmerjevalne poti. Druga faza se imenuje vzdrževanje poti (angl. route maintenance) in se jo izvaja s pomočjo uporabe paketov napake poti (angl. route error packets) ter potrditev o uspešnem prejemu paketov.

Prednost uporabe protokola DSR je, da za usmerjanje paketov ni potrebno periodično razpršeno pošiljati zahtevkov za odkrivanje poti, saj vmesna vozlišča ne potrebujejo vzdrževati sveže informacije o usmerjevalnih poteh. Poleg tega lahko vmesna vozlišča pridobijo informacijo za usmerjanje z vpogledom v glavo paketov, ki jih posredujejo. Slabost uporabe protokola DSR so visoki režijski stroški, saj vsebuje vsak podatkovni paket v glavi celotno informacijo za usmerjanje. Druga slabost protokola DSR je, da imajo paketi zakasnitev pri odpošiljanju. Ta zakasnitev je enaka času, ki je potreben za vzpostavitev usmerjevalne poti na zahtevo.

Pri uporabi protokola DSR v kombinaciji z metriko ETX so potrebne določene prilagoditve, in sicer:

- paketi za testiranje povezav (angl. link probes) se uporabijo za merjenje verjetnosti uspešnega prenosa,

- metrika ETX za povezavo, preko katere se pošlje zahtevek za odkrivanje poti, se doda k zahtevku,
- rezultati zahtevkov za odkrivanje poti se shranijo v predpomnilnik povezav (angl. link cache), kjer se informacija o vsaki posamezni povezavi shrani ločeno.

Usmerjevalni algoritem lahko uporabi predpomnilnik povezav za iskanje najkrajših poti od izvora do ponora.

2.2.3.3 SRCR protokol

Protokol SRCR (angl. Scalable Random Cooperation Routing) je usmerjevalni protokol, ki temelji na kombinaciji poizvedovanja (angl. querying) od usmerjanja na podlagi stanja povezav in modificiranega poizvedovanja od protokola DSR, uporabljenega z metriko ETX. Vendar namesto metrike ETX uporablja protokol SRCR metriko ETT za iskanje poti z največjim pretokom. SRCR uporablja opisano optimizacijo pri protokolu DSR, kjer vozlišča posodabljajo predpomnilnik povezav v svoji parcialni bazi povezav s pomočjo informacije v paketih, ki jih posredujejo ali prestrežejo. Z drugimi besedami, poleg razpršenega pošiljanja zahtevkov za odkrivanje poti lahko vozlišča pridobijo svežo informacijo o metriki še na dva načina:

- vmesna vozlišča dodajo informacijo o metriki k informaciji o usmerjevalni poti paketa; tako je informacija vidna ostalim vozliščem na poti,
- vozlišča lahko med odkrivanjem poti s pomočjo prisluškovanja prestrežejo pakete poizvedovanja (angl. queries) in pakete odziva, ki jim niso namenjeni.

Pridobljeno informacijo o metriki nato vozlišča dodajo v svojo bazo podatkov v predpomnilniku povezav. Na podlagi podatkov v tej bazi lahko s pomočjo uporabe Dijkstrovega algoritma najdejo najkrajše možne poti.

Pri padcu povezave se pri protokolu SRCR pošlje izvoru izgubljenih paketov opozorilo. V primeru poslabšanja razmer na posamezni povezavi se prenese informacija o poslabšanju do izvorov, ki uporabljajo to povezavo, preko posredovanih podatkovnih paketov. O obstoju boljše povezave izvejo izvori preko informacije o bližnjih povezavah, ki jo vozlišča dodajo posredovanim podatkovnim paketom. V vseh opisanih primerih prizadeta vozlišča ponovno zaženejo Dijkstrov usmerjevalni algoritem.

Prednost uporabe protokola SRCR je, da le-ta pošilja informacijo o metriki povezav v podatkovnih paketih in jo zato lahko pridobijo ostala vozlišča v omrežju. Poleg slednjega lahko vozlišča prestrežejo pakete poizvedovanj in pakete odzivov ter tako pridobijo informacijo o metriki povezav. Slabost protokola SRCR so povečani režijski stroški zaradi informacije o metriki povezav v vsakem podatkovnem paketu.

Protokol SRCR je bil uporabljen pri testiranju postopka COPE v realnem testnem okolju.

2.2.4 Usmerjevalni algoritmi

Funkcija usmerjevalnega algoritma sovpada z usmerjevalno funkcijo (iii), predstavljeno v poglavju 2.2.1. Usmerjevalni algoritem najde poti med različnimi izvori in ponori v omrežju v skladu z usmerjevalnimi metrikami, ki predstavljajo ceno prenosa podatkov po tej poti. Ta proces je sestavljen iz dveh faz. Prva faza je izračun cene poti na podlagi izbrane ter uporabljene metrike. Druga faza je izbira najboljše poti z najmanjšo ceno. Glede na izbrane poti se določijo usmerjevalne tabele, ki jih uporablja usmerjevalni protokol za usmerjanje prometa po omrežju. V praksi se pogosto uporabljajo algoritmi, ki temeljijo na najkrajših poteh. Pri teh algoritmih je vsaka povezava določena s svojo dolžino oziroma utežjo, ki predstavlja ceno in je odvisna od izbrane metrike povezave. Dolžina poti je potem izračunana kot vsota posameznih dolžin povezav. Cilj algoritma je najti poti med posameznimi izvori in ponori, ki imajo najmanjšo dolžino.

Najbolj znana algoritma za iskanje minimalne dolžine poti sta Dijkstrov in Bellman-Fordov algoritem. Oba algoritma najdeta najkrajše poti od izvornega vozlišča do drugih vozlišč v omrežju s pomočjo iterativnega procesa.

2.2.4.1 Dijkstrov algoritem

Dijkstrov algoritem (Bertsekas & Gallager, 1987) je algoritem za iskanje po grafih in temelji na teoriji grafov. Uporablja se ga za reševanje problema iskanja najkrajših poti z enim izvorom v usmerjenem ali neusmerjenem grafu s samo nenegativnimi utežmi

povezav. S povečevanjem dolžine poti preko iteracij najde optimalno pot od izvora do vseh vozlišč z iskanjem poti v globino grafa. Dijkstrov algoritem spada v skupino algoritmov stanj povezav, saj primerja različne povezave v grafu med seboj.

2.2.4.2 Bellman-Fordov algoritem

Bellman-Fordov algoritem je tudi algoritem za iskanje po grafih in temelji na teoriji grafov. Uporablja se ga za reševanje problema iskanja najkrajših poti z enim izvorom v usmerjenem ali neusmerjenem grafu z negativnimi in nenegativnimi utežmi povezav. Podobno kot Dijkstrov tudi Bellman-Fordov algoritem najde optimalno pot od izvora do vseh ponorov, vendar primerja različne vektorje povezav v grafu, zato spada v skupino algoritmov vektorjev razdalj.

2.2.5 Usmerjevalne metrike

Usmerjevalne metrike se uporabljajo za določanje cene povezav. Upoštevati morajo temeljne lastnosti omrežja v skladu z zastavljenimi cilji, ki jih želimo doseči v danem omrežju. Poznamo več vrst usmerjevalnih metrik. Pri aditivnih metrikah se cena celotne poti izračuna kot vsota cen posameznih povezav na poti. Pri multiplikativnih metrikah se cena celotne poti izračuna kot produkt cen posameznih povezav na poti. Pri konkavnih metrikah pa je cena celotne poti enaka minimalni ceni posamezne povezave na poti. Različne metrike se lahko nato združujejo in uporabljajo istočasno za doseganje istega cilja. Na splošno se največ uporabljajo metrike, kot so pretok (pasovna širina), zakasnitev paketov, število skokov in verjetnost uspešnega prenosa.

V brezžičnih zankastih omrežjih so trenutno med najpogosteje uporabljenimi metrikami število skokov, ETX (De Couto, Aguayo, Bicket, & Morris, 2003), ETT (Draves, Padhye, & Zill, 2004), WCETT (Draves, Padhye, & Zill, 2004) in MIC (Yang, Wang, & Kravets, 2005). Vse te metrike spadajo med aditivne metrike. Metrika s številom skokov določi dolžino poti na podlagi števila vmesnih vozlišč oziroma povezav, ki se jih uporabi na poti do ponora. Metrika ETX (angl. Expected Transmission Count) je predlagana kot izboljšava metrike s številom skokov. Metrika odraža vpliv izgub na povezavi in hkrati neposredno favorizira poti z manjšim številom skokov. Metrika ETT (angl. Estimated Transmission Time) temelji na metriki ETX in jo izboljšuje, saj upošteva tudi pasovno širino povezav. Ker metrika ETT ne upošteva interference, sta bili razviti metrika WCETT in metrika MIC. Metrika WCETT (angl. Weighted Cumulative Expected Transmission Time) upošteva interferenco znotraj istega prometnega toka (koliko vozlišč si deli kanal), medtem ko metrika MIC (angl. Metric of Interference and Channel-switching) upošteva interferenco med tokovi (število povezav na istem kanalu).

2.2.5.1 Metrika ETX

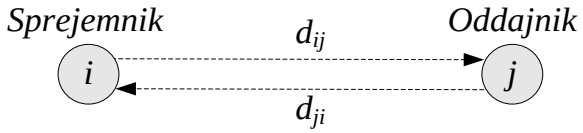
Metrika ETX je zelo poznana aditivna metrika za določanje cen brezžičnih povezav, ki je bila predlagana kot izboljšava metrike s številom skokov. Metrika se pogosto uporablja v brezžičnih zankastih omrežjih. Temelji na verjetnosti uspešnega prenosa in s tem odraža vpliv izgub na povezavah v brezžičnem mediju. Vsebuje vpliv izgub na povezavah v obe smeri (naprej in nazaj), zato upošteva lastnost asimetrije povezav. Z upoštevanjem interference med povezavami kasnejših skokov vzdolž poti tudi neposredno favorizira poti z manjšim številom skokov. Cilj metrike ETX je maksimiranje pretoka prometa v omrežju.

Metrika ETX za dano povezavo je definirana kot ocenjeno povprečje ali predvideno število prenosov (vključno s ponovitvami prenosov), potrebnih za uspešno dostavo paketa preko dane brezžične povezave. Naj bo d_{ij} verjetnost uspešnega prenosa paketa od pošiljatelja i do prejemnika j in d_{ji} verjetnost, da bo potrditev prenesenega paketa (od prejemnika j) uspešno sprejeta na vozlišču i , kot je prikazano na sliki 2.4. Potem je:

$$ETX = \frac{1}{d_{ij} \cdot d_{ji}} \tag{2.1}$$

kjer je $d_{ij} \cdot d_{ji}$ skupna verjetnost, da bo paket pravilno sprejet in sprejem paketa pravilno potrjen. ETX metrika celotne poti je potemtakem definirana kot vsota vrednosti ETX vseh

povezav na tej poti, zato se lahko za izračun poti na podlagi metrike ETX uporabi katerikoli usmerjevalni algoritem za iskanje najkrajše poti, ki minimizira ceno poti.



Slika 2.4: Brezžični povezavi med vozliščema i in j z referenčnima verjetnostma uspešnega prenosa.

Slabosti uporabe metrike ETX so sledeče:
1) Ker je metrika ETX mišljena za uporabo v enokanalnih večetapnih omrežjih, deluje slabo v več-radijskih omrežjih (angl. multi-radio networks), kjer se mora upoštevati interferenco med sosedi.
2) Metrika ETX ne upošteva različne verjetnosti pojave izgub za pakete različnih dolžin.
3) Metrika ETX ne razlikuje med brezžičnimi povezavami različnih pasovnih širin oziroma različnih prenosnih bitnih hitrosti.

2.2.5.2 Metrika ETT

Metrika ETT temelji na metriki ETX in podaja pričakovani čas, ki je potreben za uspešen prenos paketa preko dane brezžične povezave z upoštevanjem potrebe po ponovnem pošiljanju ob izgubi paketa na povezavi. Tako kot pri metriki ETX je tudi pri metriki ETT cilj maksimiranje pretoka prometa v omrežju.

Metrika ETT vsebuje vse lastnosti metrike ETX. Poleg tega pa še dodatno upošteva, da so paketi lahko različnih dolžin in da imajo lahko povezave različne prenosne hitrosti. Dolžina paketa pomembno vpliva na verjetnost uspešnega prenosa. Upoštevanje različne prenosne bitne hitrosti na posameznih brezžičnih povezavah pa omogoča enakovredno ovrednotenje povezav za lažjo integracijo njihovih vrednosti ETT v eno samo vrednost ETT celotne poti. Tako metrika ETT odpravlja pomanjkljivosti metrike ETX pod točkama (2) in (3), ki sta opisani v poglavju 2.2.5.1.

Metrika ETT za dano povezavo je definirana kot ocenjen čas, potreben za uspešen prenos paketa preko dane brezžične povezave. Naj bo S dolžina paketa in C kapaciteta povezave. Potem je:

$$ETT = ETX \cdot \frac{S}{C} \tag{2.2}$$

ETT metrika celotne poti je potemtakem definirana kot vsota vrednosti ETT vseh povezav na tej poti.

2.3 Usmerjanje z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja

Možnosti za povečanje učinkovitosti delovanja omrežij je poleg vpeljave omrežnega kodiranja potrebno iskati predvsem v povezavi z dinamičnim usmerjanjem prometa po omrežju. Postopki omrežnega kodiranja omogočajo boljše delovanje omrežij. S pomočjo ustreznega dinamičnega usmerjanja pa lahko povečamo učinkovitost rabe tovrstnih postopkov na način, da se pri usmerjanju zavedamo uporabe omrežnega kodiranja v omrežju. Pri usmerjanju z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja je potrebno iskati poti na takšen način, da omrežno kodiranje v omrežju pride čim bolj do izraza ter s tem doprinese k povečanju učinkovitosti delovanja omrežij poljubnih topologij. Promet moramo torej usmerjati tako, da usmerjanje prilagajamo lastnostim omrežnega kodiranja, ki med drugim vključujejo pojav priložnosti za kodiranje. Pri tem pa je potrebno

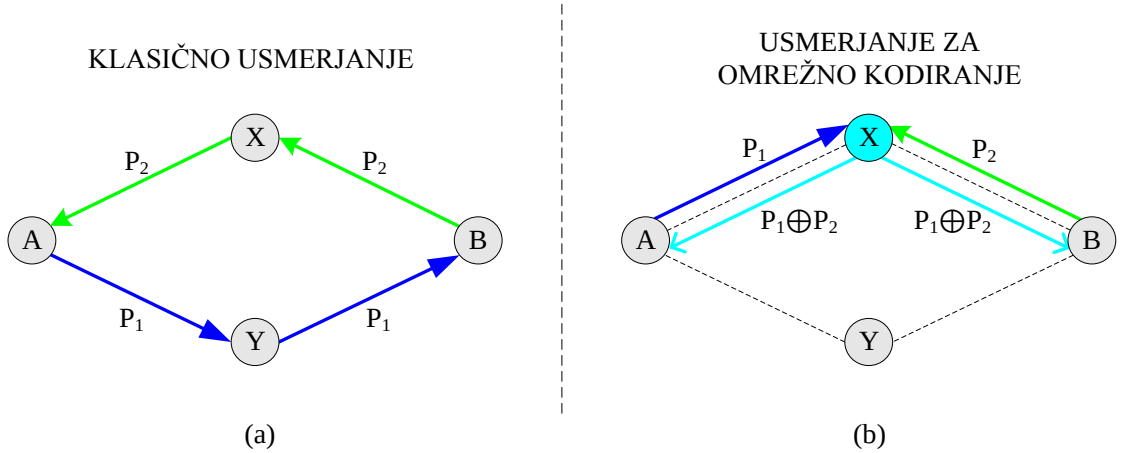
upoštevati tudi morebitne negativne vplive na prepustnost omrežja, ki jih prinaša usmerjanje po prilagojenih in običajno daljših poteh.

2.3.1 Izkoriščanje usmerjanja za omrežno kodiranje brez prisluškovanja

Zaželene lastnosti omrežnega kodiranja dosežemo s pomočjo kodiranja paketov iz različnih prometnih tokov, zato so koristi uporabe omrežnega kodiranja v veliki meri odvisne od topologije in razporeditve prometa v omrežju. Opisano odvisnost lahko izkoristimo na takšen način, da s pomočjo ustreznega usmerjanja v dani topologiji omrežja ustvarimo usmerjevalne poti za prometne tokove skozi omrežje, na katerih se povečajo priložnosti za kodiranje in s tem tudi učinkovitost uporabe omrežnega kodiranja. Pri povečanih priložnostih za kodiranje se poveča število kodiranih paketov v omrežju, kar omogoča manjšo porabo pasovne širine (v primerjavi z usmerjanjem brez zavedanja uporabe omrežnega kodiranja) za prenos enake količine prometa od izvora do ponora.

Osnovni princip usmerjanja za omrežno kodiranje lahko ponazorimo s pomočjo primera na sliki 2.5. Na sliki 2.5(a) mora vozlišče A dostaviti paket P_1 vozlišču B in vozlišče B mora dostaviti paket P_2 vozlišču A. Z usmerjanjem brez zavedanja uporabe omrežnega kodiranja se za paketa izbereta ločeni poti, kot je prikazano na sliki 2.5(a). Za takšen prenos so potrebni štirje prenosi za dostavo obeh paketov: najprej prenosi do vmesnih vozlišč X in Y, nato pa še do ponorov. S pomočjo usmerjanja z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja se za oba paketa izbere ista pot, kot je prikazano na sliki 2.5, zato se pojavi priložnost za kodiranje na vmesnem vozlišču X, ki kodira oba paketa s pomočjo ene same linearne operacije XOR v en kodiran paket $P_1 \oplus P_2$. Kodiran paket se posreduje do obeh ponorov z enim samim prenosom, zato so za dostavo obeh paketov potrebni le trije prenosi.

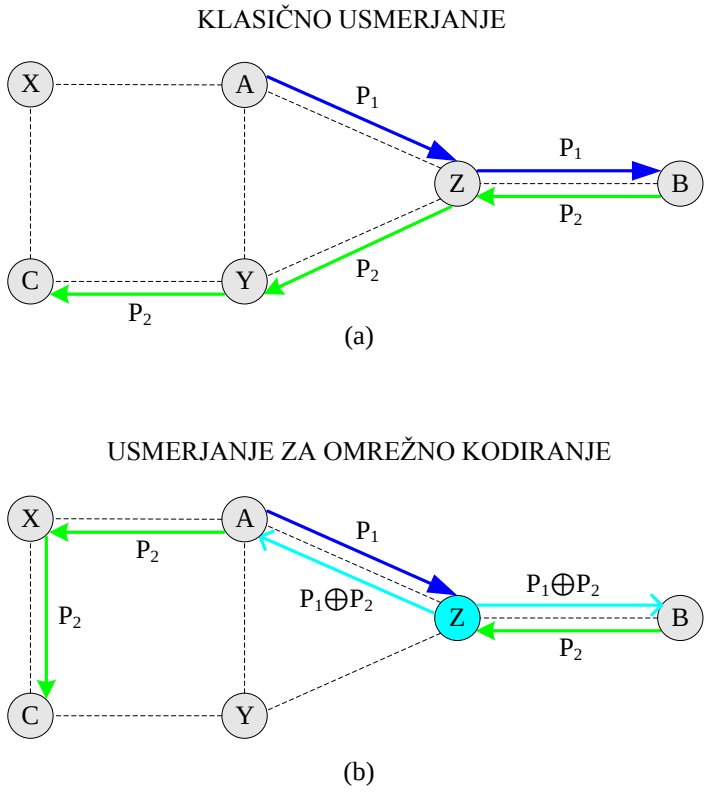
Kot je razvidno iz slike 2.5(b), teži omrežno kodiranje k združevanju različnih prometnih tokov skupaj, kar v določenem območju brezžičnega okolja povzroči dodatno interferenco med vozlišči, ki je še posebno nezaželena v brezžičnih zankastih omrežjih. Poleg tega je preusmerjanje prometa v dele omrežja, kjer promet že obstaja, lahko nezaželeno zaradi možnosti pojava prekomerne količine prometa v tem območju. Povečana interferenca in povečana količina prometa v določenem delu omrežja lahko vodita v zasičenje omrežja. Pogosto je pot, ki se jo izbere z uporabo usmerjanja za omrežno kodiranje, daljša od poti, izbrane brez uporabe usmerjanja za omrežno kodiranje. Izbira daljše poti lahko prav tako vodi v povečanje interference in prometa v omrežju, kar je tudi potrebno upoštevati pri izbiri takšne poti. Povezave na takšni poti pa so običajno slabše (tj. imajo manjšo verjetnost uspešnega prenosa) od povezav po najkrajši poti.



Slika 2.5: Usmerjanje pri omrežnem kodiranju brez prisluškovanja I: (a) brez zavedanja uporabe omrežnega kodiranja, (b) z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja.

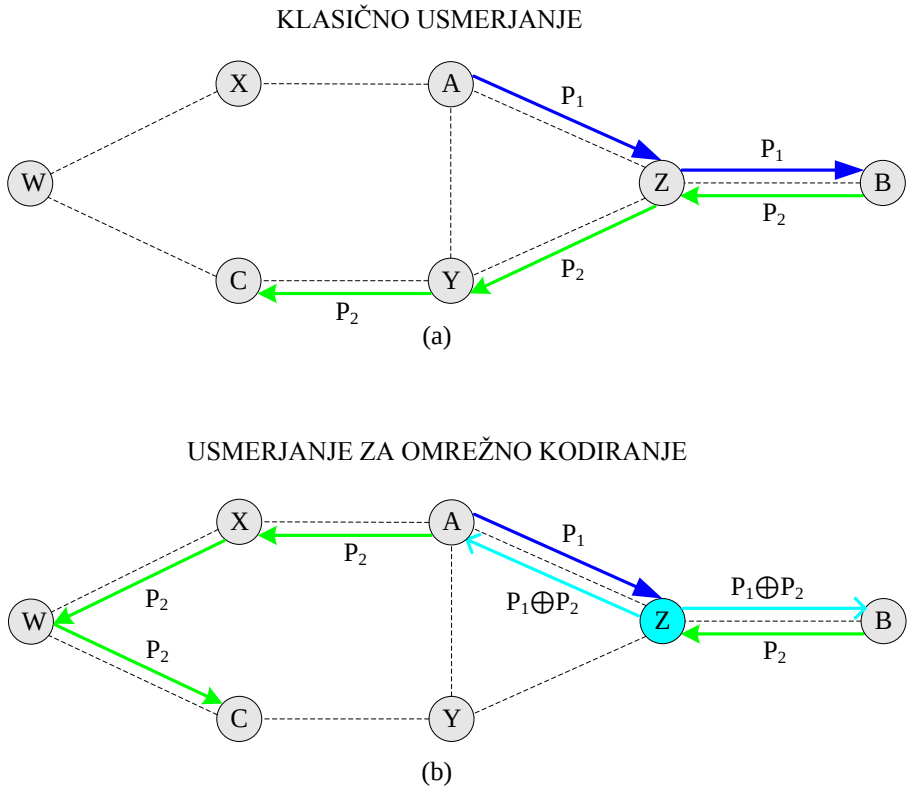
Na sliki 2.5 sta poti od vozlišča A do vozlišča B enako dolgi glede števila skokov na poti. Pojavi pa se lahko tudi primer, ko je pot, na kateri se pojavijo priložnosti za kodiranje, daljša od izbrane poti brez upoštevanja uporabe omrežnega kodiranja. Tak primer prikazuje slika 2.6, kjer mora vozlišče A dostaviti paket P_1 vozlišču B in vozlišče B mora

dostaviti paket P_2 vozlišču C. V kolikor upoštevamo, da za računanje najkrajše poti uporabimo kot metriko število skokov na poti, se za paket P_1 vedno izbere pot A → Z → B. Za paket P_2 se brez uporabe usmerjanja za omrežno kodiranje izbere najkrajša pot B → Z → Y → C. V tem primeru je za dostavo obeh paketov potrebnih 5 prenosov: $(A \rightarrow Z)_1$, $(B \rightarrow Z)_2$, $(Z \rightarrow B)_1$, $(Z \rightarrow Y)_2$ in $(Y \rightarrow C)_2$. To situacijo prikazuje slika 2.6(a). V primeru uporabe usmerjanja za omrežno kodiranje, prikazanem na sliki 2.6(b), pa se za paket P_2 izbere pot, kjer pride do priložnosti za kodiranje, in sicer: B → Z → A → X →C. Ta pot je za paket P_2 en skok daljša od poti, kjer ne pride do priložnosti za kodiranje. Vendar kljub temu še vedno potrebujemo za dostavo obeh paketov le 5 prenosov zaradi kodiranja paketov na vozlišču Z: $(A \rightarrow Z)_1$, $(B \rightarrow Z \text{ in } Z \rightarrow A)_{1\oplus 2}$, $(A \rightarrow X)_2$in $(X \rightarrow C)_2$. Ker je vozlišče Z, na katerem bo prišlo do kodiranja, ozko grlo v predstavljeni situaciji, bo uporaba omrežnega kodiranja prišla do izraza kljub enakemu številu potrebnih prenosov kot z usmerjanjem brez upoštevanja omrežnega kodiranja.



Slika 2.6: Usmerjanje pri omrežnem kodiranju brez prisluškovanja II: (a) brez zavedanja uporabe omrežnega kodiranja, (b) z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja.

Če nadalje razširimo problem na sliki 2.6 in mu dodamo vozlišče W, kot je to prikazano na sliki 2.7, potrebuje paket P_2 pri usmerjanju za omrežno kodiranje še en dodaten skok do svojega ponora. Sedaj je potrebnih že 6 prenosov za dostavo obeh paketov z uporabo usmerjanja za omrežno kodiranje: $(A \rightarrow Z)_1$, $(B \rightarrow Z \text{ in } Z \rightarrow A)_{1\oplus 2}$, $(A \rightarrow X)_2$, $(X \rightarrow W)_2$, in $(W \rightarrow C)_2$. To bo povzročilo več prometa v omrežju za dostavo enake količine paketov. V primeru, da je vpliv dodatnega prometa manjši od vpliva doprinosa uporabe usmerjanja za omrežno kodiranje, je takšno usmerjanje upravičeno. V nasprotnem primeru pa je bolje, če se promet usmerja po poteh, kjer ne pride do pojava priložnosti za kodiranje, saj bi imelo le-to nasprotni učinek od želenega.

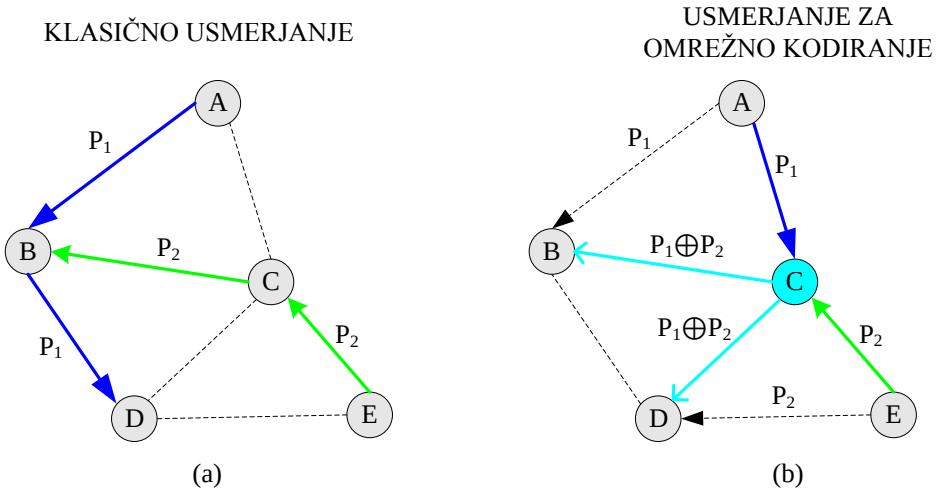


Slika 2.7: Usmerjanje pri omrežnem kodiranju brez prisluškovanja III: (a) brez zavedanja uporabe omrežnega kodiranja, (b) z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja.

2.3.2 Izkoriščanje usmerjanja za omrežno kodiranje s prisluškovanjem

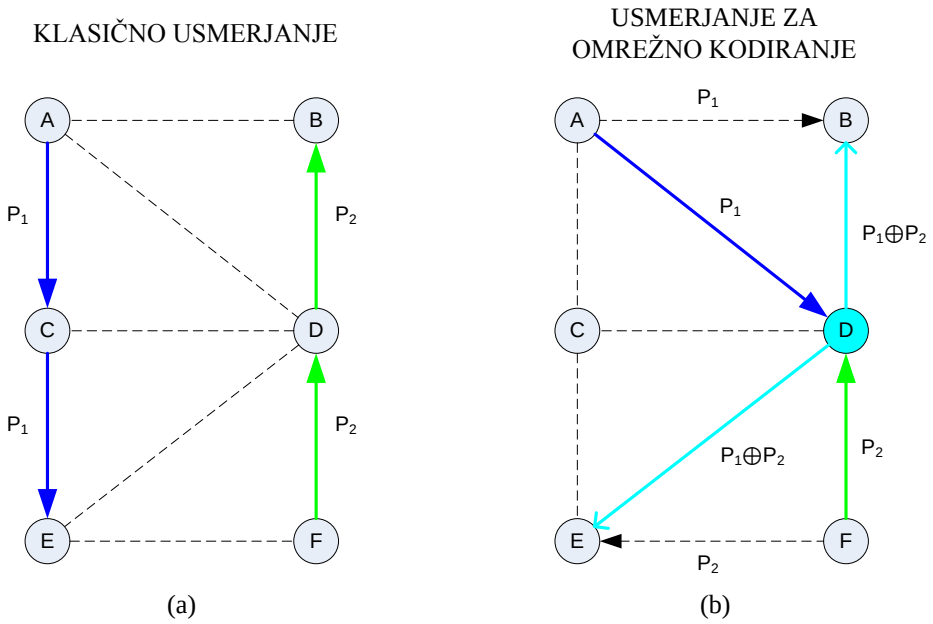
V brezžičnem omrežju se pojavljajo različne situacije za izkoriščanje usmerjanja za omrežno kodiranje. V nadaljevanju sta predstavljeni dve situaciji za boljše razumevanje tega koncepta.

Na sliki 2.8 mora vozlišče A dostaviti paket P_1 vozlišču D in vozlišče E mora dostaviti paket P_2 vozlišču B. Brez upoštevanja uporabe omrežnega kodiranja (slika 2.8(a)) lahko vozlišče A pošlje paket P_1 preko vozlišča B. Pri tem so potrebni štirje prenosi za dostavo obeh paketov: $(A \rightarrow B)_1$, $(E \rightarrow C)_2$, $(B \rightarrow D)_1$ in $(C \rightarrow B)_2$. V primeru upoštevanja uporabe omrežnega kodiranja (slika 2.8(b)) pa vozlišče A pošlje paket P_1 vozlišču C, kjer pride do priložnosti za kodiranje, zato so potrebni le še trije prenosi za dostavo obeh paketov: $(A \rightarrow C)_1$, $(E \rightarrow C)_2$ in $(C \rightarrow D$ in $C \rightarrow B)_{1\oplus 2}$. Ker je vozlišče B prestreglo prenos vozlišča A pri pošiljanju paketa P_1, lahko dekodira kodiran paket $P_1 \oplus P_2$ in pridobi informacijo o paketu P_2. Podobno lahko vozlišče D dekodira kodiran paket $P_1 \oplus P_2$ in pridobi informacijo o paketu P_1, saj je prestreglo prenos vozlišča E pri pošiljanju paketa P_2. Primer se razlikuje od primerov na slikah 2.5 in 2.6 po tem, da se kodirata takšna paketa, katerih vmesni vozlišči na prejšnjem skoku nista enaki vmesnima vozliščema na naslednjem skoku, zato se dekodiranje zgodi s pomočjo prestreženih paketov, ki niso namenjeni vozliščem, kar omogoča tudi omrežno kodirni postopek COPE, predstavljen v poglavju 2.1.3. V tem primeru mora usmerjanje za omrežno kodiranje le zaznati priložnost za kodiranje na vozlišču C in mu posredovati paket P_1.



Slika 2.8: Usmerjanje pri omrežnem kodiranju s prisluškovanjem I: (a) brez zavedanja uporabe omrežnega kodiranja, (b) z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja.

Na sliki 2.9 je prikazan še en primer izkoriščanja usmerjanja za omrežno kodiranje s prisluškovanjem, kjer potekata dva prometna tokova po nasprotujočih si poteh in vključujeta v proces prenosa popolnoma različna vozlišča. Tudi v takšnem primeru se lahko izkorišča priložnosti za kodiranje. Vozlišče A mora dostaviti paket P_1 vozlišču E in vozlišče F mora dostaviti paket P_2 vozlišču B. Brez upoštevanja uporabe omrežnega kodiranja se lahko zgodi, da se določijo usmerjevalne poti, kot je prikazano na sliki 2.9(a). V tem primeru so za dostavo obeh paketov potrebni štirje prenosi: $(A \rightarrow C)_1$, $(F \rightarrow D)_2$, $(C \rightarrow E)_1$ in $(D \rightarrow B)_2$. Pri upoštevanju uporabe omrežnega kodiranja pa vozlišče A posreduje paket P_1 vozlišču D, zato pride na vozlišču D do priložnosti za kodiranje. Za dostavo obeh paketov so potrebni sedaj le še trije prenosi: $(A \rightarrow D)_1$, $(F \rightarrow D)_2$ in $(D \rightarrow E$ in $D \rightarrow B)_{1\oplus 2}$.



Slika 2.9: Usmerjanje pri omrežnem kodiranju s prisluškovanjem II: (a) brez zavedanja uporabe omrežnega kodiranja, (b) z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja.

2.4 Postopki usmerjanja z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja

Predhodno delo na področju usmerjanja z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja se ukvarja predvsem z iskanjem usmerjevanih poti, na katerih se pojavi več priložnosti za kodiranje na podlagi informacije o topologiji in trenutnega prometa v omrežju. Usmerjanje za omrežno kodiranje poskuša usmerjati pakete na način, da se jih čim več kodira, pri čemer upošteva tudi ostale parametre v omrežju, kot so interferenca, prometna obremenitev, število skokov na poti itd. Večina usmerjevalnih shem za omrežno kodiranje temelji na reaktivnem izvornem usmerjanju, ki najprej zahteva pridobitev informacije za usmerjanje s pomočjo protokola za odkrivanje poti. S pomočjo te informacije se potem izračunajo poti in določi usmerjanje prometa skozi omrežje. To prinaša dodatne zakasnitve v omrežje, zato je takšno usmerjanje primerno za promet z manjšim številom prometnih tokov in manjšimi spremembami komunikacijskih vzorcev v omrežju.

Zadnja leta so bili v literaturi zasnovani in predstavljeni različni usmerjevalni postopki za omrežno kodiranje z namenom izboljšanja koristnosti uporabe omrežnega kodiranja ter posledično povečanja pretoka prometa skozi omrežje (Iqbal, Dai, Huang, Hassan, & Yu, 2011). Avtorji so zasnovali različne koncepte za usmerjanje z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja in upoštevali različne učinke in omejitve brezžičnih omrežij.

Različne usmerjevalne metrike so bile predlagane v (Yifei, Cheng, Qin, & Jun, 2009) in (Wang, 2010) z namenom vzpostavitve ravnovesja med interferenčno degradacijo in kodirnim dobitkom. Metrike dosegajo kompromis med usmerjanjem prometnih tokov »blizu skupaj« za pojav večjega števila kodirnih priložnosti in usmerjanje prometnih tokov »narazen« za zmanjšanje medsebojne interference.

Teoretični okvirji usmerjanja za omrežno kodiranje so bili predstavljeni v (Sengupta, Rayanchu, & Banerjee, 2010) za zmanjšanje števila potrebnih prenosov in interference med vozlišči. Delo ponuja zanimiv vpogled v zasnovo protokolov, ki združujejo omrežno kodiranje in tehnike za usmerjanje po eni ali več poteh.

Postopek ROCX (angl. Routing with Opportunistically Coded Exchanges) je bil predlagan v (Ni, Santhapuri, Zhong, & Nelakuditi, 2006) za zmanjšanje celotnega števila kodiranih prenosov s pomočjo usmerjevalne metrike ECX (angl. Exchange) in temelji na centraliziranem usmerjanju z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja. Pristop doseže optimalen kompromis med priložnostmi za kodiranje in najkrajšo potjo. ECX je metrika, ki temelji na metriki ETX. ECX izračuna pričakovano število uspešnih prenosov z uporabo kodiranja za izvedbo optimalnega usmerjanja pri dani topologiji in prometu v omrežju.

Centralizirani pristopi, kot so v (Sengupta, Rayanchu, & Banerjee, 2010) in (Ni, Santhapuri, Zhong, & Nelakuditi, 2006), lahko ponujajo optimalne rešitve za dani problem, vendar povzročajo problem skalabilnosti, zato jih je težko vgraditi v brezžična zankasta omrežja.

Aktiven visoko-prepusten optimalen usmerjevalni protokol za omrežno kodiranje, imenovan ANCHOR, je bil predstavljen v (Jiao, Wang, & Zhou, 2008). Temelji na porazdeljenem reaktivnem usmerjanju. Protokol poskuša optimizirati usmerjevalno pot z ustvarjanjem priložnosti za kodiranje na način obveščanja dotičnih vozlišč o tem, da lokalno posodobijo svoje usmerjevalne poti.

Protokol NCAR (angl. Network Coding Aware Routing) (Wei, Zhao, Xi, & Wang, 2009) temelji na porazdeljenem izvornem usmerjanju, podobnem kot protokol AODV (Perkins & Royer, Ad-hoc on-demand distance vector routing, 1999). Sestavljen je iz treh korakov: določitve kodirnih pogojev, procesa odkrivanja poti in procesa izbire poti. Protokol najde najboljše kodirne rešitve na vmesnih vozliščih, pri čemer upošteva tudi uspešnost prenosa posameznih povezav in priložnosti za kodiranje. V primeru pojava več prometnih tokov in kodirnih shem uporablja metriko ETC-NC (angl. Expected Transmission Count based on Network Coding), ki je izboljšana metrika ECX za razlikovanje med bolj in manj zanesljivimi kodirnimi shemami.

Protokol RCR (angl. Rate-adaptive coding-aware multiple path routing) (Yan, Zhao, Zhang, Mouftah, & Ma, 2008) temelji na porazdeljenem reaktivnem usmerjanju, podobnem kot protokol DSR (Johnson & Maltz, 1996). Uporablja tri zasnovane metrike: RTN (angl. Required Transmission Number), MCR (angl. Matched Coding Rate) in CAR (angl. Congestion Avoidance Rate). Metrika RTN predstavlja število prenosov vmesnih vozlišč, ki so potrebni za posredovanje paketov posameznega prometnega toka. Metrika MCR upošteva, da imajo različni prometni tokovi različno količino prometa. S pomočjo

slednjega lahko metrika izračuna maksimalno možno količino prometa določenega prometnega toka, ki se lahko kodira z drugimi že obstoječimi prometnimi tokovi skozi določeno vmesno vozlišče. Maksimalna možna količina prometa določenega prometnega toka je tako minimalna možna količina izbrane usmerjevalne poti in je določena z vozliščem, ki predstavlja ozko grlo za to usmerjevalno pot. Metrika CAR označuje maksimalno količino prometa določenega prometnega toka, ki lahko gre skozi določeno vozlišče brez povzročanja zasičenja na tem vozlišču. S pomočjo usmerjanja prometa po več poteh in z uporabo predstavljenih metrik lahko protokol RCR učinkovito izkorišča priložnosti za kodiranje in uravnoteži prometno obremenitev v omrežju.

Porazdeljen reaktiven protokol C2AR (angl. Coding and Capacity Aware Routing) je bil predstavljen v (Jhang, Lin, & Liao, 2010). Protokol izkorišča prednosti usmerjanja z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja in prometnega uravnovešanja, tako da vzpostavlja ravnovesje med obema. Poleg iskanja priložnosti za kodiranje upošteva tudi interferenco med vozlišči in kapaciteto povezav. Zasnovana metrika EPT (angl. Estimated Path Throughput) omogoči, da se hkrati upošteva učinek omrežnega kodiranja in preostale kapacitete poti.

V (Guo, Li, Zhou, & Cheng, 2011) je bil predlagan porazdeljen reaktiven protokol, ki temelji na protokolu DSR. Zasnovan je bil za uporabo predlagane metrike FORM (angl. Free-ride-Oriented Routing metric). Protokol omogoča novemu prometnemu toku, da »prosto jezdi« na obstoječih prometnih tokovih v omrežju. To pomeni, da se nov prometni tok poskuša kodirati z obstoječimi prometnimi tokovi. FORM je sestavljen iz dveh delov. Prvi del se imenuje »prilagojena korist«, ki vključuje vpliv dolžine poti in število kodirnih vozlišč vzdolž te poti. Drugi del se imenuje »stopnja prostega jezdenja«, ki označuje obseg priložnosti za kodiranje na posamezni poti, torej poti preko vozlišč, ki imajo dovolj prometa, da pridejo kodirne priložnosti do izraza.

DCAR (angl. Distributed Coding-Aware Routing) (Le, Lui, & Chiu, 2010) je porazdeljen reaktiven izvorni protokol, ki lahko kodira pakete na poti tudi za več kot dva skoka. Za lažjo primerjavo med potmi, na katerih lahko pride do kodiranja, in potmi, na katerih ne pride do kodiranja, uporablja metriko CRM (angl. Coding-aware Routing Metric). CRM metrika označuje pričakovano število prenosov za uspešen prenos obstoječih in prihajajočih paketov za vsak nov prometni tok v omrežju. Metrika najde le podoptimalne poti, saj ne vsebuje pomembne matematične lastnosti, imenovane izotoničnost (angl. isotonicity). Izotoničnost zahteva, da se zaporedje uteži dveh poti ne spremeni, če se tema dvema potema doda tretjo skupno pot (Peng, Yang, Lu, & Ding, 2010).

Porazdeljen reaktiven protokol za usmerjanje z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja PN-CAR (angl. Practical Network-Coding-Aware Routing) se uporablja za seje pri oddajanju enemu sprejemniku. Predlagan je bil za rešitev problema metrike CRM pri protokolu DCAR. Protokol temelji na novi usmerjevalni metriki ETX-CA (angl. Expected Transmission Count with Coding Awareness), ki zajema značilnosti omrežnega kodiranja in sej pri oddajanju enemu sprejemniku. Za zagotavljanje izotoničnosti, potrebne za delovanje predlagane usmerjevalne metrike s tradicionalnimi usmerjevalnimi mehanizmi, je uporabljen edinstven proces mapiranja realnega brezžičnega omrežja v virtualno omrežje. V virtualnem omrežju se najde optimalne poti glede priložnosti za kodiranje s pomočjo usmerjevalnih algoritmov za iskanje najkrajših poti na podlagi predlagane usmerjevalne metrike.

V (Xie, Chong, Liew, & Guan, 2013) avtorji predlagajo princip, imenovan doslednost pri kodiranju in prestrezanju CEO (angl. Consistency of Encoding and Overhearing). Princip rešuje problem, ki se pojavlja v večini predlaganih usmerjevalnih shem za omrežno kodiranje (Le, Lui, & Chiu, 2010; Jhang, Lin, & Liao, 2010; Guo, Li, Zhou, & Cheng, 2011; Peng, Yang, Lu, & Ding, 2010), ki lahko napačno detektirajo priložnosti za kodiranje, predvsem pri ponovnem kodiranju paketa. Z izogibanjem kodiranja paketov, ki se kasneje ne morejo dekodirati na naslednjih skokih, zagotavlja princip CEO uspešno dekodiranje vseh kodiranih paketov. Za doseganje porazdeljenega principa CEO sta bila predlagana dva mehanizma in nadalje integrirana v protokol DCAR (predstavljen zgoraj).

2.5 Umestitev predlaganega postopka usmerjanja glede na obstoječe postopke

Obstoječi reaktivni usmerjevalni postopki z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja so tipično tesno povezani z omrežno kodirnimi shemami, ki običajno temeljijo na omrežno kodirnem postopku COPE, ter namensko razvitimi metrikami. Pri teh postopkih se priložnosti za kodiranje izračunajo na podlagi dane topologije in trenutnega prometa v omrežju za odkrivanje poti z več priložnostmi za kodiranje. Postopke uporabljamo skupaj z reaktivnim izvornim usmerjanjem, pri katerem se izračunava usmerjevalno pot za vsak nov prometni tok v omrežju posebej, saj tudi postopki iščejo priložnosti za kodiranje za vsak nov prometni tok. Teh postopkov pa ne moremo uporabiti skupaj s proaktivnim etapnim usmerjanjem, pri katerem se usmerjevalne poti periodično izračunavajo sočasno za vse prometne tokove v omrežju. V tem primeru bi se moralo sočasno iskati priložnosti za kodiranje med vsemi prometnimi tokovi v omrežju. Nekatere izmed usmerjevalnih poti se po posodobitvi usmerjevalnih tabel spremenijo, kar vpliva na priložnosti za kodiranje za posamezne prometne tokove. Iskanje priložnosti za kodiranje v kombinaciji z ostalimi vplivi v brezžičnem omrežju je kompleksen problem in lahko vodi v podoptimalne rešitve, v kolikor se ga rešuje s pomočjo porazdeljenih proaktivnih shem, zato morajo biti rešitve ustrezno in pazljivo ovrednotene. V doktorski disertaciji se s tovrstnimi problemi nismo ukvarjali.

V literaturi objavljeni rezultati usmerjanja v povezavi z omrežnim kodiranjem so pokazali, da lahko s takšnim usmerjanjem dosežemo povečanje učinkovitosti omrežno kodirnih postopkov v omrežju, vendar so rezultati omejeni na skrbno izbrane topologije omrežja in prometne tokove, kar kliče po iskanju bolj splošno veljavnih rešitev. Med manj raziskane dinamične načine usmerjanja, na katerih bi lahko temeljile nove rešitve, med drugimi spadajo usmerjanje na podlagi meritev o uspešnosti kodiranja v omrežju, uporaba agentov za usmerjanje v povezavi z omrežnim kodiranjem in upoštevanje obremenitve vozlišč pri usmerjanju in kodiranju.

V nadaljevanju doktorske disertacije predlagamo inovativen postopek proaktivnega usmerjanja, ki izkorišča informacijo o dejansko izmerjenem uspehu pri kodiranju različnih prometnih tokov. S pomočjo razlikovanja med dobro kodiranimi in slabo kodiranimi prometnimi tokovi v zasičenih delih omrežja v prvi vrsti omogoča usmerjanje za preprečevanje pojava nasičenja. Poleg tega predlagani postopek posredno vpliva na pojav priložnosti za kodiranje v omrežju na način, da najbolj obremenjene dele omrežja razbremeni prometa, ki se v tem območju najslabše kodira. Čeprav ni zagotovila, da se bodo preusmerjeni prometni tokovi kodirali na novih poteh, se s preusmeritvijo najmanj kodiranih ali/in nekodiranih prometnih tokov v manj obremenjene dele omrežja razbremeni najbolj obremenjeno vozlišče in prepreči pojav zasičenosti na tem vozlišču in njeni okolici. Prav tako pa se s preusmeritvijo teh prometnih tokov poveča število paketov, ki se uspejo kodirati v ostalih prometnih tokovih. V nekaterih primerih pa se vzdolž novih alternativnih poti ustvarijo kodirne priložnosti za preusmerjene slabo kodirane prometne tokove, čeprav slednje ni primarni cilj postopka CANCAR. Ker ne išče priložnosti za kodiranje na podlagi vnaprej dane topologije omrežja in porazdelitve prometa, je primeren za proaktivno in etapno usmerjanje, ki omogoča takojšnje odpošiljanje paketov novega prometnega toka brez dodatnih zakasnitev. Zato je predlagani postopek primernejši za promet z gostimi in zelo dinamičnimi komunikacijskimi vzorci, ki imajo tudi največ koristi od uporabe omrežnega kodiranja. S tem predstavlja postopek CANCAR popolnoma nov pristop, kako lahko pri uporabi omrežnega kodiranja in proaktivnega usmerjanja v omrežju koristimo informacijo o kodiranju. Seveda pa ne moremo uporabiti postopka CANCAR v omrežjih, kjer uporabljamo reaktivno usmerjanje, kot ne moremo uporabiti obstoječih porazdeljenih reaktivnih usmerjevalnih postopkov v omrežjih, kjer uporabljamo proaktivno usmerjanje. Zato moramo gledati na usmerjevalne postopke za omrežno kodiranje, ki smo jih na kratko predstavili v poglavju 2.2, kot na komplementarne rešitve k predlaganemu postopku CANCAR in ne kot postopke, s katerimi bi lahko primerjali razviti postopek CANCAR. Cilj obstoječih usmerjevalnih postopkov za omrežno kodiranje je iskanje usmerjevalnih poti, na katerih pride do povečanja priložnosti za kodiranje, medtem ko je cilj postopka CANCAR izkoriščanje informacije o priložnostih za kodiranje za podporo pri izogibanju pojavu zasičenja v omrežju in posledično povečanju učinkovitosti uporabe omrežnega kodiranja.

Poglavje 3

Postopek dinamičnega usmerjanja CANCAR

S pojavom novih tehnik in postopkov upravljanja s prenosnimi viri se v telekomunikacijah vedno znova pojavlja problem medsebojnega vpliva novih in obstoječih postopkov. Na nivoju optimizacije uporabe omrežnih prenosnih virov je s tega stališča pomembno analizirati, kako prilagoditi obstoječe postopke za čim večjo izkoriščenost novo uvedenih postopkov v omrežje. V okviru doktorske disertacije smo raziskovali delovanje omrežnega kodiranja v povezavi z dinamičnim usmerjanjem kot uveljavljenega usmerjevalnega postopka v naprednih telekomunikacijskih omrežjih. Namen dela je bil predlagati izboljšave obstoječih ali zasnovo novih dinamičnih usmerjevalnih postopkov za povečanje učinkovitosti uporabe omrežnega kodiranja in s tem zagotavljanja večje prepustnosti v brezžičnih omrežjih. Natančneje, v okviru doktorske disertacije smo proučevali izhodiščno hipotezo, da lahko s pomočjo na novo razvitega ustreznega praktičnega postopka za dinamično usmerjanje, ki se zaveda in upošteva lastnosti omrežnega kodiranja, izboljšamo ali vsaj ohranimo prepustnost v poljubni omrežni topologiji s poljubno prometno obremenitvijo. Želeli smo, da osnova predlaganega postopka temelji na uveljavljenih usmerjevalnih tehnikah za omrežja naslednje generacije za lažjo integracijo postopka v obstoječo strukturo telekomunikacijskih omrežij.

Obstoječe rešitve temeljijo na postavki, da lahko s pomočjo izkoriščanja dinamičnega usmerjanja najdemo v omrežju poti, na katerih pride do večjega števila priložnosti za kodiranje, kar rezultira v večjem številu kodiranih paketov in povečanem pretoku omrežja. Pri izbiri poti z več priložnostmi za kodiranje moramo upoštevati tudi gostoto prometa na teh poteh, da preprečimo zasičenje omrežja, saj usmerjanje z upoštevanjem omrežnega kodiranja stremi k združevanju prometnih tokov. To ima v brezžičnih omrežjih za posledico ne le zasičenje omrežja s prometom, ampak tudi povečanje interference zaradi povečanja delovnega cikla vozlišč, ki se nahajajo znotraj medsebojnega pokrivanja določenega območja. Pri usmerjanju z upoštevanjem omrežnega kodiranja zato velja upoštevati informacijo o uspešnosti pri kodiranju in razlikovati med dobro kodiranim in slabo kodiranim prometom. Ideja v nadaljevanju predlaganega postopka je, da na podlagi slednjega učinkovito preusmerimo del prometa iz zelo obremenjenih (ali celo zasičenih) delov omrežja v manj obremenjene dele omrežja in tako preprečimo, da pride do zasičenja omrežja ter omogočimo še večje kodirne dobitke v omrežju. Na podlagi zgornjih dejstev smo razvili postopek dinamičnega usmerjanja z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja CANCAR.

3.1 Zasnova preusmerjanja na podlagi uspešnosti pri kodiranju

V realnih omrežnih topologijah lahko nekateri deli omrežja predstavljajo ozka grla in zgoščevanje prometa v teh delih omrežja lahko povzroči preobremenitev ali celo zasičenje omrežja. Usmerjanje z upoštevanjem omrežnega kodiranja pa običajno prav v teh delih omrežja dodatno zgosti prometne tokove. Za preprečevanje pojava zasičenj v omrežju zato predlagamo, da se zaznajo prometno bolj obremenjeni deli omrežja in se promet v teh delih loči na podlagi uspešnosti posameznih prometnih tokov pri kodiranju. Za prometne tokove, katerih paketi se pogosto kodirajo skupaj na določenem vozlišču, pravimo, da so bolj uspešni pri kodiranju. Nasprotno pa slabo kodiran ali slabše kodiran promet predstavljajo prometni tokovi, katerih paketi se ne kodirajo ali se le redko kodirajo, zato se jih smatra kot prometne tokove z majhno uspešnostjo pri kodiranju. V splošnem slabše

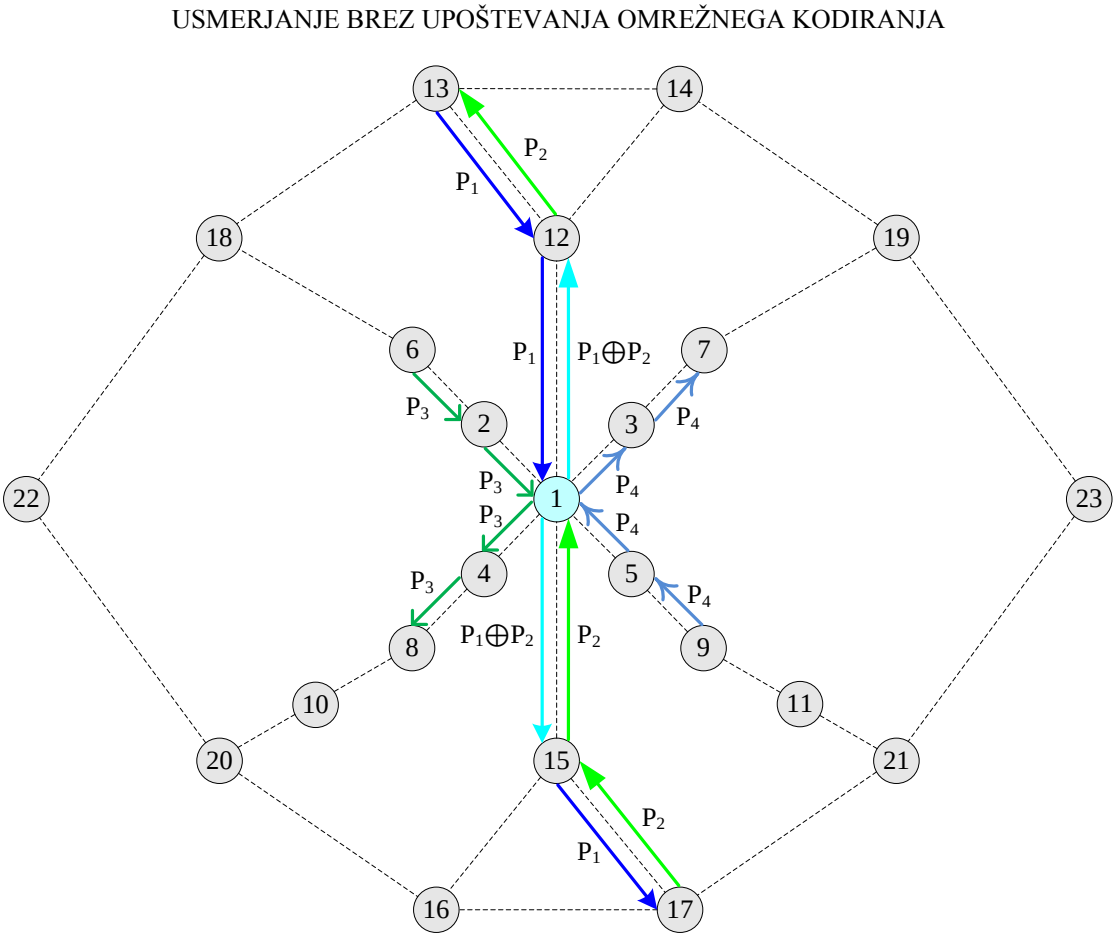
kodiran promet preprečuje, da bi se več paketov kodiralo na posameznem vozlišču, saj imajo vozlišča omejeno pasovno širino in omejeno dolžino čakalnih vrst. Zato predlagamo, da se slabše kodiran promet preusmeri stran od najbolj obremenjenih delov omrežja. To omogoča ostalemu, bolje kodiranemu prometu na vozlišču nadaljnje (oziroma pogostejše) kodiranje zaradi povečanega delovnega cikla vozlišča za ta promet in posledično več kodiranih paketov v ozkem grlu omrežja. S pomočjo preusmeritve prometa pa se zmanjšata ne le prometna obremenitev, ampak tudi interferenca, ki jo povzroča slabše kodiran promet v visoko obremenjenih delih omrežja. Na drugi strani se pa lahko preusmerjen, slabše kodiran promet potencialno bolje kodira na preusmerjenih poteh v ostalih delih omrežja.

Opisan koncept predlaganega usmerjanja je prikazan na reprezentativnem delu omrežja na sliki 3.1, kjer so predstavljene vse lastnosti predlaganega usmerjanja z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja. Prikazana topologija je bila skrbno izbrana za lažje razumevanje predlaganega koncepta, vendar (kot pokažemo kasneje) se koncept lahko uporabi v poljubni topologiji omrežja, kjer le-ta znatno doprinese k večji uspešnosti omrežnega kodiranja in boljšemu delovanju omrežja.

Za lažjo razlago predpostavimo generiranje štirih prometnih tokov med naslednjimi pari vozlišč, ki predstavljajo izvore in ponore: 13-17, 17-13, 6-8 in 9-7. Vsak od paketov P_1, P_2, P_3 and P_4 ustreza enemu izmed pripadajočih generiranih prometnih tokov, kot je to prikazano na sliki 3.1. Vsi tokovi se sekajo v vozlišču 1 ob predpostavki, da je za usmerjanje izbran usmerjevalni algoritem za iskanje najkrajših poti z usmerjevalno metriko števila skokov na poti. Izbrane usmerjevalne poti so takrat sledeče:

13-17: 13→12→1→15→17,
17-13: 17→15→1→12→13,
6-8: 6→2→1→4→8,
9-7: 9→5→1→3→7.

V dani prometni situaciji predstavlja vozlišče 1 ozko grlo. Brez uporabe omrežnega kodiranja potrebuje vozlišče 1 štiri prenose za posredovanje paketov P_1, P_2, P_3, and P_4, medtem ko so z uporabo omrežnega kodiranja potrebni le trije prenosi, saj lahko vozlišče 1 kodira paketa P_1 and P_2 v en kodiran paket $P_1 \oplus P_2$ in ga razpršeno pošlje do vozlišč 12 in 15.

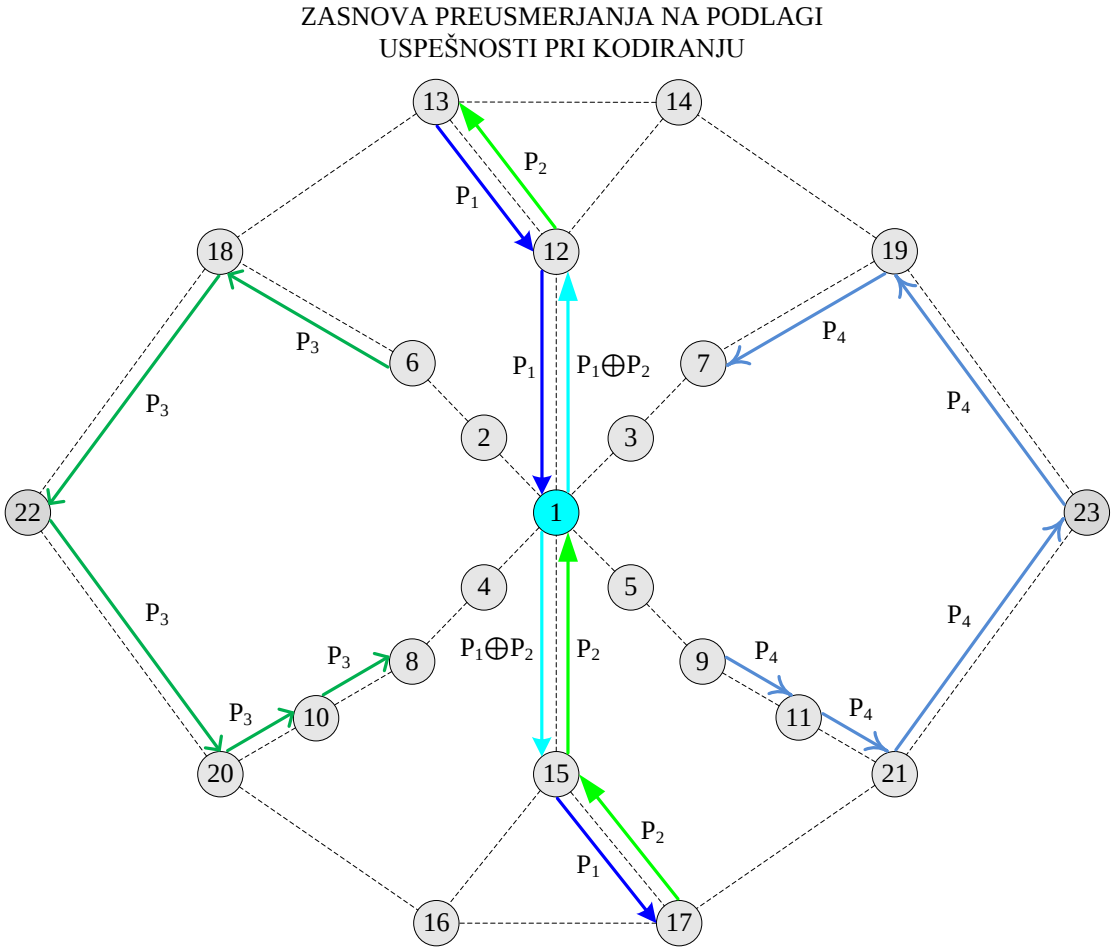


Slika 3.1: Referenčni scenarij 1: usmerjanje brez upoštevanja omrežnega kodiranja.

Na sliki 3.2 so paketi preusmerjeni na alternativne poti okoli vozlišča 1 z namenom preprečitve zasičenja omrežja v ozkem grlu. Pri našem pristopu predlagamo, da se preusmerita paketa P_3 in P_4, ki se ne moreta kodirati v vozlišču 1. V tem primeru se paketa preusmerita na ločeni alternativni poti, ki sta za en skok daljši kot poti skozi vozlišče 1, vendar nista visoko prometno obremenjeni:

6-8: 6→18→22→20→10→8,
9-7: 9→11→21→23→19→7.

Paketa P_1 and P_2 se še vedno usmerjata po najkrajši poti skozi vozlišče 1, kjer se lahko kodirata, zato lahko sedaj vozlišče 1 posreduje vse pakete, ki potujejo skozi njega, z enim samim prenosom.



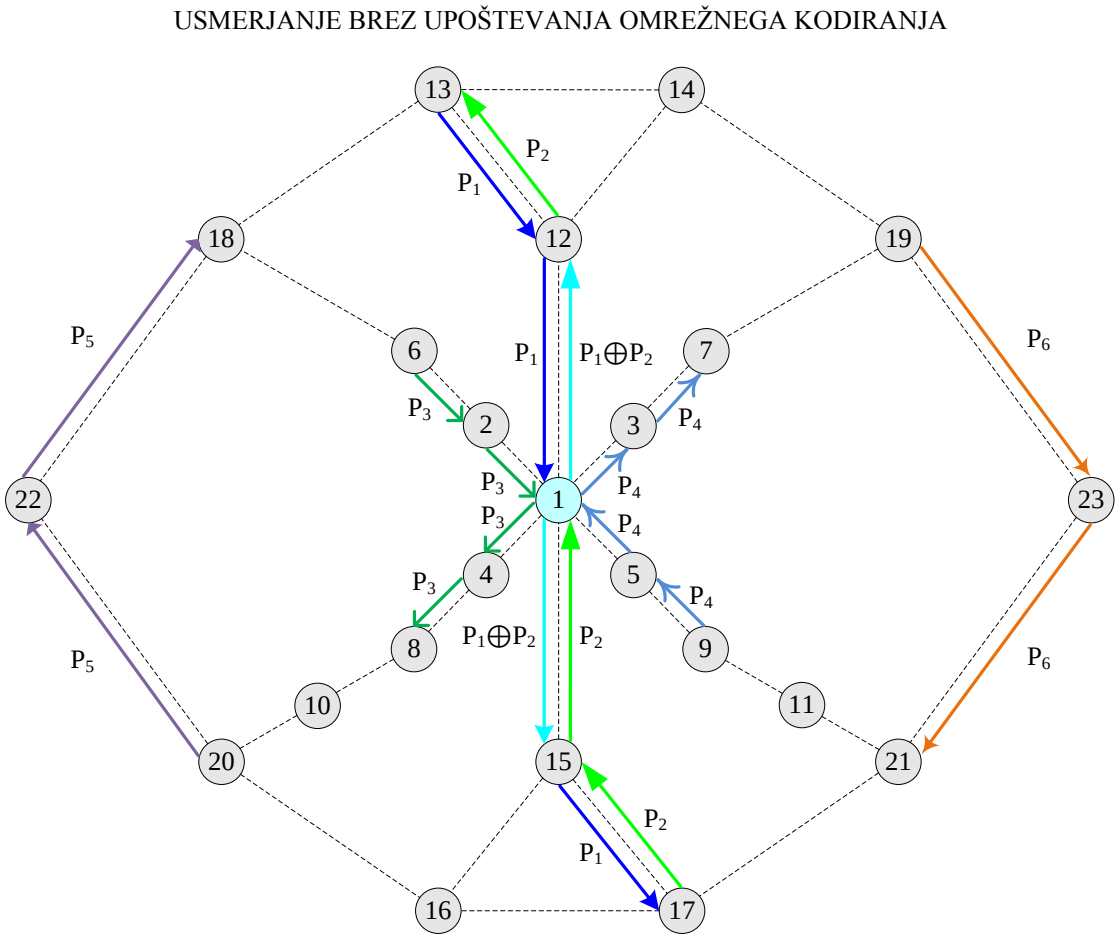
Slika 3.2: Referenčni scenarij 1: zasnova preusmerjanja na podlagi uspešnosti pri kodiranju.

Če nadalje predpostavljamo, da je v vsakem prometnem toku po več paketov, se lahko v primeru na sliki 3.1 teoretično kodira največ 2/4 vseh paketov, ki potujejo skozi vozlišče 1, ki predstavlja ozko grlo v predstavljenem scenariju. Paketi prometnih tokov med izvornima in ponornima vozliščema 13-17 in 17-13 se bodo ob visokem prometu v omrežju kodirali na vozlišču 1. Paketi prometnih tokov 6-8 in 9-7 pa se ne bodo kodirali na tem vozlišču. V primeru na sliki 3.2 pa se lahko teoretično kodirajo vsi paketi, ki potujejo skozi vozlišče 1, saj smo odstranili prometna tokova 6-8 in 9-7 iz vozlišča 1. Ob upoštevanju, da imajo vozlišča omejeno pasovno širino in dolžino čakalnih vrst, bi v primeru na sliki 3.1 nekateri paketi v ozkem grlu popadali iz čakalne vrste, ko bi bila ta polna. S preusmeritvijo paketov v prometnih tokovih, ki se ne kodirajo na vozlišču 1, omogočimo, da se kodira več paketov v kodiranih prometnih tokovih v primeru na sliki 3.2, kar omogoča večjo prepustnost omrežja.

V drugem scenariju predpostavimo, da obstajata dva dodatna prometna tokova med izvornima in ponornima vozliščema 20-18 in 19-21, ki se usmerjata po poteh, kot je prikazano na sliki 3.3:

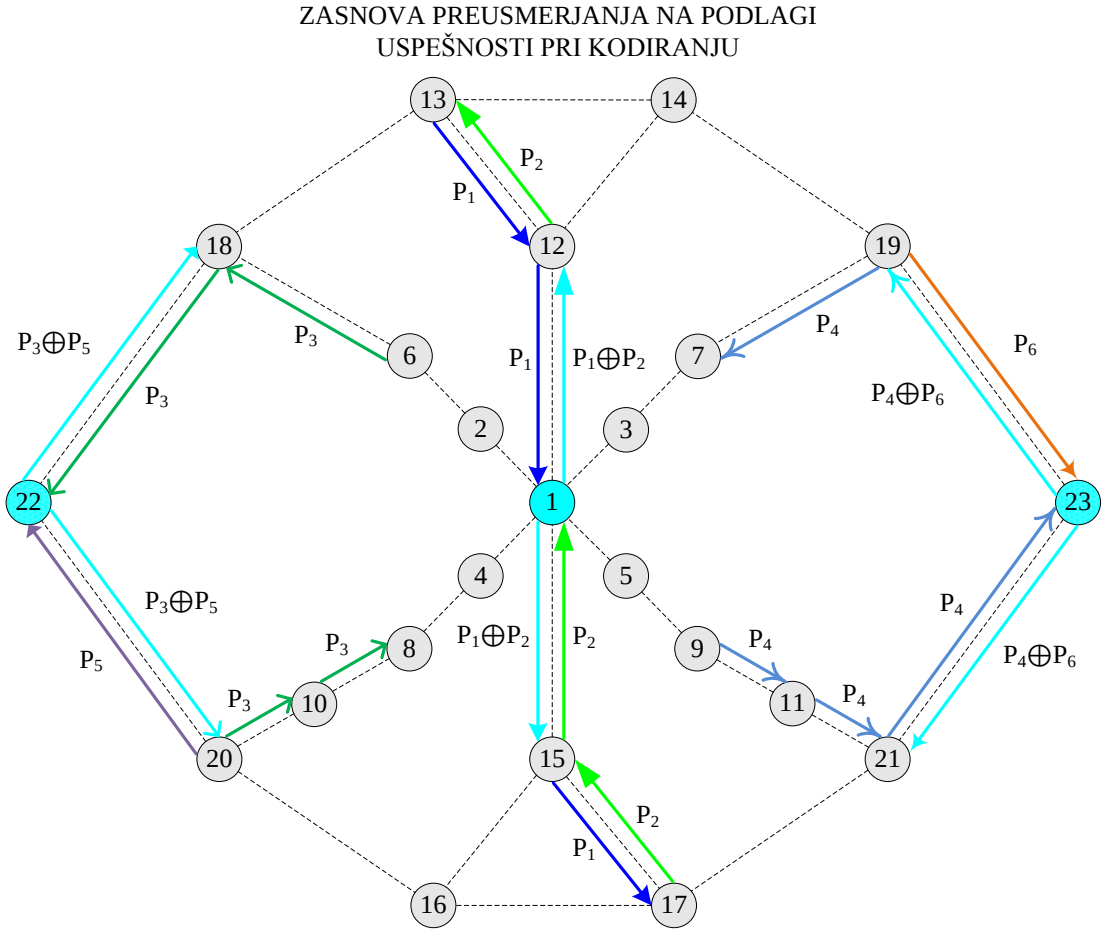
20-18: 20→22→18,
19-21: 19→23→21.

Paketa P_5 in P_6 ustrezno pripadata tema dvema prometnima tokovoma.



Slika 3.3: Referenčni scenarij 2: usmerjanje brez upoštevanja omrežnega kodiranja.

Ti dve poti sekata alternativni poti paketov P_3 in P_4. V takšnem primeru imata paketa P_3 in P_4, ki se usmerjata po alternativnih poteh, tudi priložnosti za kodiranje, kot prikazano na sliki 3.4. Paket P_3 se lahko kodira s paketom P_5 ($P_3 \oplus P_5$) na vozlišču 22 in paket P_4 se lahko kodira s paketom P_6 ($P_4 \oplus P_6$) na vozlišču 23. Za paketa P_5 in P_6 se torej pojavijo priložnosti za kodiranje, ki prav tako omogočijo, da se v primeru velike prometne obremenitve izvrže manj paketov iz čakalnih vrst na vozliščih 22 in 23. V tem primeru se torej s preusmeritvijo prometnih tokov, ki se v ozkem grlu omrežja ne kodirajo, ne le izognemo zasičenju vozlišča 1, ampak celo zagotovimo kodiranje preusmerjenih tokov in s tem dodatno izboljšamo skupno prepustnost omrežja.



Slika 3.4: Referenčni scenarij 2: zasnova preusmerjanja na podlagi uspešnosti pri kodiranju.

3.2 Postopek usmerjanja CANCAR

Za implementacijo predlaganega koncepta v poglavju 3.1 v enovit postopek usmerjanja za preprečevanje zasičenja z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja CANCAR (angl. Congestion-Avoidance Network Coding-Aware Routing) je potrebna prilagoditev obstoječih tradicionalnih usmerjevalnih postopkov (uporabljenih tudi pri postopku COPE) ter zasnova novih postopkov za detekcijo večje količine prometa v omrežju in za preusmeritev dela slabše kodiranih prometnih tokov iz delov omrežja z visoko gostoto prometa.

Predlagani postopek zbira informacijo o uspešnosti posameznih prometnih tokov pri kodiranju, ki se jo meri med delovanjem omrežja. Ko je omrežje močno obremenjeno, postopek določi najbolj obremenjeno vozlišče v omrežju in poskuša učinkovito preusmeriti slabše kodirane prometne tokove stran od tega vozlišča v manj obremenjene dele omrežja. S tem lahko bolje kodirani prometni tokovi pridobijo več priložnosti za kodiranje na najbolj obremenjenem vozlišču in se zato lahko nadalje kodirajo, kar pripomore k povečanju prepustnosti v ozkem grlu omrežja. Poleg tega pa se lahko sedaj preusmerjeni slabše kodirani ali nekodirani prometni tokovi kodirajo s prometnimi tokovi v ostalih delih omrežja. Predlagani postopek zazna in se izogne tako povezavam kot vozliščem, kjer lahko pride do zasičenja, upoštevajoč različno stopnjo uspešnosti prometnih tokov pri kodiranju.

Postopek CANCAR je proaktiven usmerjevalni postopek z usmerjanjem na podlagi stanja povezav. Postopek izvaja porazdeljeno dinamično proaktivno usmerjanje na podlagi obstoječih tradicionalnih usmerjevalnih postopkov. Uporabi se ga lahko z različnimi

priložnostnimi omrežno kodirnimi algoritmi. V doktorski disertaciji smo ga zasnovali z omrežno kodirnim postopkom COPE, ki se ga pogosto uporabi za primerjavo z razvitim usmerjevalnim postopkom za kodiranje. S tem smo omogočili neposredno kvalitativno primerjavo postopka CANCAR z ostalimi obstoječimi postopki, ki temeljijo na postopku COPE. Celoten postopek CANCAR je sestavljen iz več korakov. Ti so združeni v tri glavne faze, kjer so v prvi in drugi fazi uporabljeni prilagojeni tradicionalni usmerjevalni pristopi. V prvi fazi se zbere informacija, ki je potrebna za izvedbo usmerjanja. Informacija se razpošlje preko omrežja do vsakega vozlišča. V drugi fazi se izračunajo poti na podlagi tradicionalnih usmerjevalnih postopkov. Tretja faza je jedro postopka CANCAR in predstavlja glavno novost v predlaganem postopku. V tej fazi se izračunajo alternativne poti in izberejo prometni tokovi, ki se bodo preusmerili na te poti na podlagi algoritma za izbiro alternativnih poti. Vse tri faze natančneje opišemo v nadaljevanju.

3.2.1 Zbiranje in distribucija informacije za usmerjanje

Za postopek CANCAR je najprej potrebno pridobiti informacijo za usmerjanje. S pomočjo te informacije lahko nato izračunamo usmerjevalne poti in jih zapišemo v usmerjevalne tabele za obdobje od zadnje obnovitve usmerjevalnih tabel. Zajem informacije se zgodi pred vsakim izračunom usmerjevalnih tabel. Na vsakem vozlišču v omrežju se pridobi informacija o:

- verjetnosti uspešnega prenosa na brezžičnih povezavah,
- povprečnem številu paketov v čakalnih vrstah vozlišč,
- številu izvrženih paketov iz čakalnih vrst,
- številu paketov v vsakem obstoječem prometnem toku skozi posamezno vozlišče,
- deležu kodiranih paketov v vsakem obstoječem prometnem toku na posameznem vozlišču.

Po zajemu informacije se izračuna usmerjevalna metrika ETX. Vrednost metrike ETX za vsako posamezno povezavo in povprečno število paketov v čakalni vrsti vozlišča se nato odpošlje s pomočjo sporočil za informacijo o usmerjanju (angl. routing information messages) do vsakega vozlišča v omrežju.

3.2.2 Izračun najkrajših poti

V tej fazi se poišče usmerjevalne poti s pomočjo Dijsktrovega usmerjevalnega algoritma za iskanje najkrajših poti. Kot metriko za iskanje najkrajših poti se uporabi metriko ETX, ki se jo izračuna na podlagi verjetnosti uspešnega prenosa povezav.

Izračun vseh najkrajših usmerjevalnih poti se izvede ob vsakem intervalu posodobitve usmerjevalnih tabel. Izračun se izvede na porazdeljen način na vsakem vozlišču v omrežju na podlagi informacije, pridobljene iz sporočil za informacijo o usmerjanju, ter lokalne informacije, dostopne na posameznem vozlišču. Po tej fazi vsebuje vsako vozlišče v omrežju svojo usmerjevalno tabelo najkrajših poti, na podlagi katere lahko izbere najkrajše poti za usmerjanje paketov.

3.2.3 Izračun in izbor alternativnih poti

Pri postopku CANCAR se takoj po izračunu najkrajših poti izračunajo in izberejo alternativne poti za posamezne pare vozlišč s pomočjo petih sekvenčnih korakov:

1. korak: Določitev najbolj obremenjenega vozlišča
2. korak: Izračun alternativnih poti
3. korak: Preusmeritev na alternativne poti
4. korak: Obveščanje vozlišč o izboru alternativnih poti
5. korak: Usmerjanje paketov

V nadaljevanju natančneje opišemo vsak korak izračuna in izbora alternativnih poti posebej.

3.2.3.1 Določitev najbolj obremenjenega vozlišča

Najprej je potrebno določiti trenutno najbolj obremenjeno vozlišče v omrežju na podlagi povprečnega števila paketov v čakalnih vrstah vozlišč. Ta informacija se pošlje preko omrežja skupaj z ETX vrednostmi povezav vozlišč v sporočilih za informacijo o usmerjanju in je zato na voljo brez zakasnitev ob intervalu posodobitve usmerjevalnih tabel. V kolikor

je povprečno število paketov v čakalni vrsti vozlišča večje ali enako pragovni vrednosti parametra P_Q, se smatra, da je vozlišče visoko obremenjeno ali zasičeno. Vozlišče z največjim povprečnim številom paketov v čakalni vrsti vozlišča se potem določi kot trenutno najbolj obremenjeno vozlišče v omrežju. Vsako vozlišče v omrežju zase določi trenutno najbolj obremenjeno vozlišče. Če trenutno ne obstaja nobeno visoko obremenjeno vozlišče, se preostali koraki v danem intervalu posodobitve usmerjevalnih tabel preskočijo in se ves promet usmerja v skladu z obstoječimi usmerjevalnimi tabelami, saj se predpostavlja, da je prometna obremenjenost omrežja nizka.

3.2.3.2 Izračun alternativnih poti

V tem koraku se na vsakem vozlišču v omrežju izračunajo alternativne poti okoli najbolj obremenjenega vozlišča in njegove okolice ter zgradijo usmerjevalne tabele alternativnih poti v skladu z definicijo 3.1.

Definicija 3.1 (Izračun alternativnih poti). Naj bo vozlišče V_C trenutno najbolj obremenjeno vozlišče med vsemi vozlišči V v omrežju, kjer je V_x vozlišče x ($x = 1,2, \dots, i, j, \dots, N_V$). Naj bo e_{ij} povezava med vozliščema V_i in V_j. Naprej naj bodo V_N sosednja vozlišča vozlišča V_C in V_I sosednja vozlišča vozlišča V_N. Potem se *alternativne poti* izračunajo s pomočjo Dijkstrovega usmerjevalnega algoritma na pod-omrežju, ki ne vključuje povezav e_{CN}, e_{NC}, e_{NI} in e_{IN}.

Na slikah 3.1, 3.2, 3.3 in 3.4 predstavlja vozlišče 1 trenutno najbolj zasičeno vozlišče V_C, vozlišča 2, 3, 4, 5, 12 in 15 predstavljajo vozlišča V_N, medtem ko vozlišča 6, 7, 8, 9, 13, 14, 16 in 17 predstavljajo vozlišča V_I. Povezave, ki se jim izognemo pri izračunu alternativnih poti, so torej povezave e_{12}, e_{21}, e_{13}, e_{31}, e_{14}, e_{41}, e_{15}, e_{51}, e_{26}, e_{62}, e_{37}, e_{73}, e_{48}, e_{84}, e_{59} in e_{95} $e_{1\,12}$, $e_{12\,1}$, $e_{1\,15}$, $e_{15\,1}$, $e_{12\,13}$, $e_{13\,12}$, $e_{12\,14}$, $e_{14\,12}$, $e_{15\,16}$, $e_{16\,15}$, $e_{15\,17}$, $e_{17\,15}$.

To pomeni, da so brezžične povezave najbolj obremenjenega vozlišča in njegovih sosedov (v obeh smereh) izvzete pri izračunu alternativnih poti. Smatra se, da te povezave pri izračunu alternativnih poti v omrežju ne obstajajo.

Z izolacijo trenutno najbolj obremenjenega vozlišča se pri izračunu alternativnih poti praktično izognemo temu vozlišču, z neupoštevanjem brezžičnih povezav sosedov najbolj obremenjenega vozlišča pa zmanjšamo interferenco sosedov z najbolj obremenjenim vozliščem, saj delujejo vozlišča na isti frekvenci in zato medsebojno interferirajo. Tako se verjetnost uspešnega prenosa povezav bistveno poveča in vozlišča v tem območju uspejo uspešno prenesti več kodiranih in nekodiranih paketov. Vozlišča uspejo tudi prestreči več paketov, ki se uporabijo za dekodiranje kodiranih paketov z omrežno kodirnim algoritmom COPE; več prestreženih paketov pomeni večje število dekodiranih paketov in posledično boljše delovanje omrežnega kodiranja v ozkem grlu omrežja.

3.2.3.3 Preusmeritev na alternativne poti

Najbolj obremenjeno vozlišče izbere prometne tokove, ki bodo preusmerjeni na pripadajoče alternativne poti, izračunane v prejšnjem koraku. Ta korak se izvede lokalno le na najbolj obremenjenem vozlišču in zato ne povzroči nobenih režijskih stroškov v omrežju.

Ta korak je glavni korak postopka CANCAR in bo zaradi svoje pomembnosti ločeno predstavljen v poglavju 3.3.

3.2.3.4 Obveščanje vozlišč o izboru alternativnih poti

V tem koraku najbolj obremenjeno vozlišče obvesti izvorna vozlišča prometnih tokov, ki so izbrana v 3. koraku (oziroma poglavju 3.2.3.3), naj preusmerijo prometne tokove na alternativne poti. Najbolj obremenjeno vozlišče enostavno pošlje tem vozliščem kratko poročilo. Dokler se ta informacija ne razširi preko celotnega omrežja, se vsi prometni tokovi usmerjajo preko najkrajših poti, ki se izračunajo v poglavju 3.2.2.

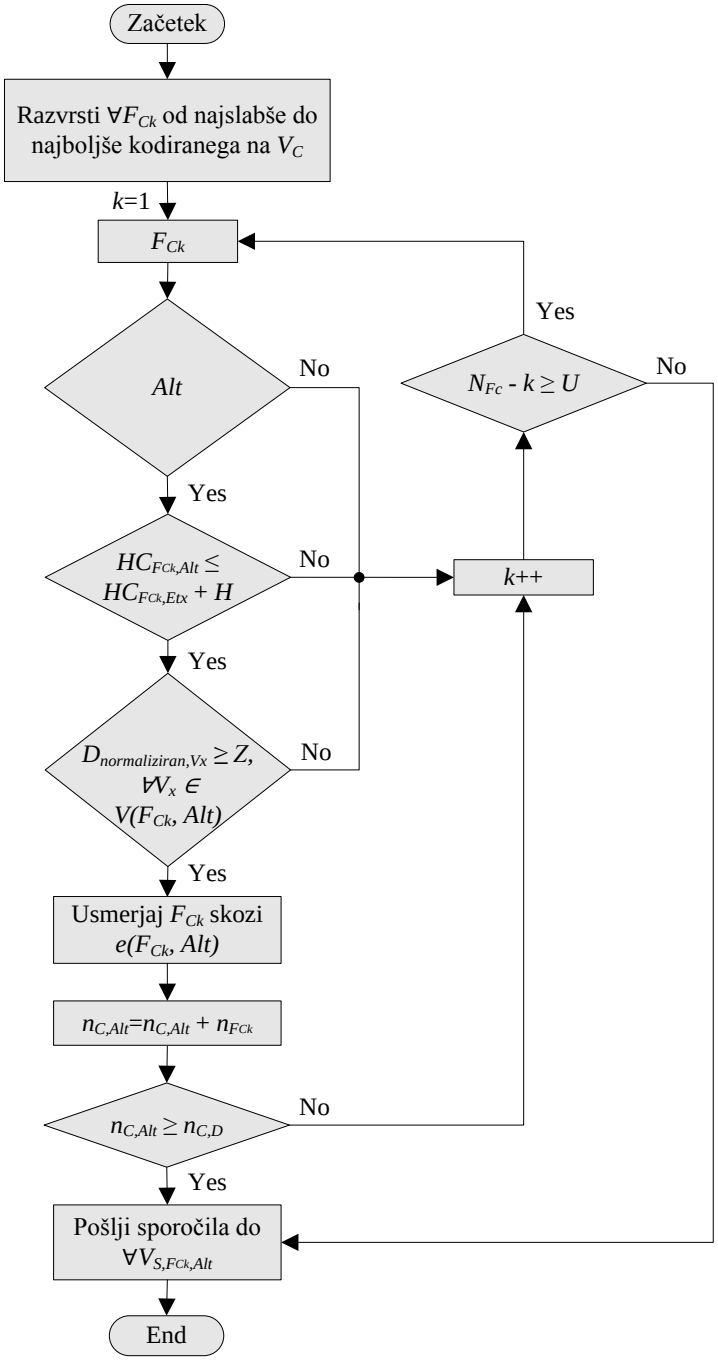
3.2.3.5 Usmerjanje paketov

Paketi se usmerjajo preko omrežja na podlagi statusa dodane zastavice v glavi paketov. Izvorna vozlišča nastavijo zastavico za vsak paket in s tem določijo, ali se bo paket usmerjal po alternativni poti (zastavica je nastavljena) ali se bo usmerjal po najkrajši poti (zastavica ni nastavljena). S stališča povečanja režije pomeni to en dodaten porabljen bit v

čelu vsakega paketa. Vsako vmesno vozlišče na usmerjevalni poti preveri status zastavice in na podlagi te določi usmerjevalno tabelo (usmerjevalno tabelo najkrajših poti ali usmerjevalno tabelo alternativnih poti), po kateri bo posredovalo posamezen paket. Za prometne tokove, ki so izbrani v 3. koraku (oziroma poglavju 3.2.3.3), se zastavica nastavi, za vse ostale prometne tokove pa se zastavica ne nastavi.

3.3 Algoritem za usmerjanje z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja

Po določitvi trenutno najbolj obremenjenega vozlišča V_C med vsemi vozlišči V v omrežju in izračunu alternativnih poti algoritem za usmerjanje izbere, kateri prometni tokovi bodo preusmerjeni iz najbolj obremenjenega vozlišča. Shema algoritma je prikazana na sliki 3.5, medtem ko so označbe, uporabljene v shemi, zbrane in razložene v tabeli 3.1.



Slika 3.5: Shema algoritma za preusmeritev na alternativne poti.

Tabela 3.1: Označbe za shemo predstavljenega algoritma.

Označba	Opis
V_C	najbolj obremenjeno vozlišče v omrežju
F_{Ck}	prometni tok k, ki gre skozi vozlišče V_C
k	zaporedna številka F_{Ck} glede na uspeh pri kodiranju
$HC_{F_{Ck},Alt}$	število skokov na alternativni poti F_{Ck}
$HC_{F_{Ck},Etx}$	število skokov na najkrajši poti, izračunani z usmerjevalno metriko ETX
H	parameter za določanje maksimalnega dovoljenega povečanja $HC_{F_{Ck},Alt}$ v primerjavi s $HC_{F_{Ck},Etx}$
$D_{normaliziran}$	parameter za preverjanje visoke obremenjenosti vozlišča
Z	prag podobne obremenjenosti vozlišč
V_x	vozlišče x
$V(F_{Ck}, Alt)$	niz vozlišč na alternativni poti F_{Ck}
$n_{C,Alt}$	število paketov v vseh že preusmerjenih prometnih tokovih F_{Ck}
$n_{F_{Ck}}$	število paketov v preusmerjenem prometnem toku F_{Ck} na V_C
$n_{C,D}$	število izvoženih paketov iz čakalne vrste vozlišča V_C
N_{F_C}	število vseh prometnih tokov F_{Ck}
U	minimalno število prometnih tokov, ki se jih ne preusmeri iz vozlišča V_C
$F_{Ck,Alt}$	preusmerjeni prometni tokovi F_{Ck}
$V_{S,F_{Ck,Alt}}$	izvorno vozlišče $F_{Ck,Alt}$

3.3.1 Razvrščanje prometnih tokov

Najprej se vse obstoječe prometne tokove F_{Ck}, ki gredo skozi najbolj obremenjeno vozlišče V_C, razvrsti glede na uspešnost pri kodiranju. Razvrsti se jih od prometnega toka z najmanj kodiranimi paketi na vozlišču V_C do prometnega toka z največ kodiranimi paketi na vozlišču V_C ($k = 1,2, \dots, i, j, \dots, N_{F_C}$). Pri tem si pomagamo z informacijo o deležu kodiranih paketov v vsakem obstoječem prometnem toku na vozlišču V_C. Ta informacija se v postopku CANCAR uporabi kot informacija o izmerjeni dejanski uspešnosti kodiranja prometa.

Predpostavlja se, da določen prometni tok trenutno obstaja in prečka najbolj obremenjeno vozlišče, če je število paketov prometnega toka skozi to vozlišče večje od nič.

Prometni tokovi z veliko kodiranimi paketi na vozlišču V_C predstavljajo dobro kodiran promet, medtem ko prometni tokovi z malo kodiranimi paketi na V_C predstavljajo slabo kodiran promet.

Po razvrstitvi prometnih tokov izbere algoritem prvi prometni tok ($k = 1$) z najmanj kodiranimi paketi in ga analizira.

3.3.2 Preverjanje obstoja alternativne poti

Algoritem preveri za analizirajoči prometni tok, če zanj obstaja alternativna pot Alt okrog trenutno najbolj obremenjenega vozlišča v skladu z definicijo 3.1. Ta pot obstaja, če za usmerjanje analizirajočega prometnega toka obstajajo alternativne povezave v omrežju, ki ne pripadajo nobeni od povezav e_{CN}, e_{NC}, e_{NI} in e_{IN}.

V primeru, da alternativna pot za ta prometni tok po definiciji 3.1 ne obstaja, se bo prometni tok usmerjal preko najkrajše povezave in algoritem izbere naslednji prometni tok ter ga analizira.

3.3.3 Preverjanje števila skokov na alternativni poti

Če obstaja alternativna pot za analizirajoči prometni tok, algoritem preveri, ali je pot okrog najbolj obremenjenega vozlišča dovolj kratka po kriteriju števila skokov na poti s pomočjo enačbe (3.1):

$$HC_{F_{Ck},Alt} \leq HC_{F_{Ck},Etx} + H \tag{3.1}$$

$HC_{F_{Ck},Etx}$ je število skokov na najkrajši poti, $HC_{F_{Ck},Alt}$ pa je število skokov na alternativni poti. $H = 0,1,2,\ldots$ je maksimalno dovoljeno povečanje števila skokov na alternativni poti v primerjavi z najkrajšo potjo.

V skladu z enačbo (3.1) velja, da se v primeru povečanja števila skokov alternativne poti za več kot H prometni tok usmerja preko najkrajše povezave, torej ostane na vozlišču V_C, algoritem pa izbere naslednji prometni tok in ga analizira.

S pomočjo tega pravila preprečimo, da bi izbrali predolge alternativne poti, kar bi opazno povečalo zakasnitve v omrežju in povzročilo večjo skupno prometno obremenitev omrežja ter večji nivo interference v omrežju, saj bi isti prometni tok zasedel več povezav vzdolž alternativnih usmerjevalnih poti v omrežju.

3.3.4 Preverjanje količine prometa na alternativni poti

Algoritem nato preveri obremenjenost alternativne poti. Naj bo $V(F_{Ck}, Alt)$ niz vozlišč, ki jih prečka prometni tok F_{Ck} vzdolž alternativne poti. V primeru, če je eno izmed vozlišč V_x iz niza $V(F_{Ck}, Alt)$ podobno obremenjeno kot najbolj obremenjeno vozlišče V_C, se smatra, da je alternativna pot podobno obremenjena kot najkrajša pot in se zato analizirajoči prometni tok ne more preusmeriti.

Ali je vozlišče visoko obremenjeno ali ne, določimo s pomočjo razlike med povprečnim številom paketov v čakalni vrsti najbolj obremenjenega vozlišča V_C, $\bar{q}_C$ in povprečnim številom paketov v čakalni vrsti vozlišča V_x, $\bar{q}_x$, normalizirane z dolžino čakalne vrste vozlišč Q_V, kot je določeno z enačbo (3.2):

$$D_{normaliziran,V_x} = \frac{\bar{q}_C - \bar{q}_x}{Q_{V_x}} \tag{3.2}$$

Vozlišče V_x se nato smatra za podobno obremenjeno kot najbolj obremenjeno vozlišče V_C, če velja naslednje pravilo:

$$D_{normaliziran,V_x} < Z \tag{3.3}$$

Z predstavlja prag podobne obremenjenosti vozlišč in je definiran kot $0 \leq Z \leq 1$. Nižji kot je prag Z, več je vozlišč, skozi katere lahko potekajo alternativne poti, in obratno.

3.3.5 Določitev alternativne poti kot usmerjevalne poti za promet

V kolikor analizirajoči prometni tok izpolnjuje vse zgoraj navedene potrebne pogoje, se izbere alternativna pot okrog najbolj obremenjenega vozlišča kot usmerjevalna pot za dani prometni tok.

3.3.6 Preverjanje količine prometa, izbrane za preusmeritev iz najbolj obremenjenega vozlišča

Algoritem med posameznimi intervali posodobitve usmerjevalnih tabel šteje sprejete pakete v vsakem obstoječem prometnem toku skozi vsako posamezno vozlišče, $n_{F_{Xx}}$. Ob posodobitvi usmerjevalnih tabel in preusmerjanju slabo kodiranih prometnih tokov na alternativne poti se algoritem na podlagi te informacije iz preteklega časovnega intervala

odloči, koliko prometnih tokov naj skuša preusmeriti. Cilj algoritma je po kriterijih v predhodnih podpoglavjih preusmeriti na alternativne poti vsaj toliko prometnih tokov F_{Ck}, da je vsota njihovih paketov skozi vozlišče V_C v preteklem časovnem intervalu, torej $\sum n_{F_{Ck}}$, enaka ali večja od števila izvrženih paketov iz čakalne vrste vozlišča V_C v preteklem časovnem intervalu $n_{C,D}$, kot podaja enačba (3.4).

$$\sum n_{F_{Ck}} \geq n_{C,D} \tag{3.4}$$

Ko je pogoj v enačbi (3.4) izpolnjen, smatramo, da se je preusmerilo dovolj prometa iz najbolj obremenjenega vozlišča V_C, da na njem ne bo več prišlo do zasičenja s prometom. Število prometnih tokov, ki jih skuša algoritem ob določeni posodobitvi usmerjevalnih tabel preusmeriti na alternativne poti torej ni določeno vnaprej, ampak se dinamično prilagaja številu sprejetih paketov v posameznem prometnem toku in številu izvrženih paketov iz čakalne vrste najbolj obremenjenega vozlišča.

3.3.7 Izbiranje naslednjega prometnega toka

V primeru potrebe po preusmeritvi dodatnega prometa iz najbolj obremenjenega vozlišča V_C izbere algoritem naslednji prometni tok le v primeru, da je na razpolago še več kot U prometnih tokov za preusmeritev iz vozlišča V_C. S tem želimo zagotoviti, da se U najbolje kodiranih prometnih tokov vedno usmerja skozi vozlišče V_C, in preprečimo, da bi ostalo vozlišče V_C popolnoma brez prometa ter bi prišlo do oscilacij prometa. V primeru, da se nekateri paketi na vozlišču V_C kodirajo, je smiselno postaviti vrednost U vsaj na dva. Tako ohranimo že obstoječe minimalne priložnosti za kodiranje. Za kodiranje na V_C sta potrebna namreč vsaj dva prometna tokova.

3.4 Ovrednotenje signalizacije za predlagano usmerjanje

Pri usmerjanju igrajo zelo pomembno vlogo režijski stroški in obseg signalizacije, saj lahko predstavljajo opazen delež vsega prometa, s čimer znižajo skupno prepustnost omrežja. V omrežjih prihodnosti, kot so kognitivna omrežja, kjer v veliko primerih režijski stroški predstavljajo večji delež prometa v omrežju kot v današnjih omrežjih, lahko na področju načina prenosa režijskih stroškov pričakujemo drastične spremembe, ki jih avtorji obravnavajo v (Che-Aron, Abdalla, Abdullah, & Mahmoud, 2013; Cesana, Cuomo, & Ekici, 2011; Abdelaziz & Einainay, 2012; Jain, 2012; Selvakanmani & Sumathi, 2012; Sun, Zheng, Rawat, Sawant, & Koutsonikolas, 2013). V tem poglavju ocenimo režijske stroške, potrebne za implementacijo postopka CANCAR v realno okolje. Predvsem nas zanima primerjava signalizacije v primeru postopka CANCAR s signalizacijo za tradicionalno dinamično proaktivno usmerjanje na podlagi stanja povezav z usmerjevalno metriko ETX.

Ker uporablja postopek CANCAR tradicionalno usmerjanje kot podporni usmerjevalni mehanizem, ima tudi vse njegove osnovne režijske stroške. Poleg teh režijskih stroškov postopek CANCAR potrebuje dodatno signalizacijo za opravljanje funkcij usmerjanja za preprečevanje zasičenja z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja. Zato najprej ovrednotimo režijske stroške tradicionalnega usmerjanja in nato dodatne režijske stroške, ki jih zahteva le postopek CANCAR.

Za porazdeljeno in dinamično usmerjanje na podlagi metrike ETX mora vsako vozlišče poslati ostalim vozliščem informacijo o metriki ETX za vsako povezavo. Če je povprečno število povezav vozlišča enako N_x in je informacija o ETX določene povezave podana z 8 biti, je v sporočilu za informacijo o usmerjanju informacija o ETX velikosti:

$$I_{ETX} = N_x \cdot 8\ bits \tag{3.5}$$

V primeru usmerjanja s postopkom CANCAR mora vsako vozlišče poslati informacijo o metriki ETX in o povprečnem številu paketov v čakalni vrsti vozlišča. Če predpostavimo, da je informacija o povprečnem številu paketov v čakalni vrsti vozlišča tudi podana z 8 biti, je velikost informacije, potrebne za usmerjanje s postopkom CANCAR:

$$I_{CANCAR} = I_{ETX} + 8\ bits = (N_x + 1) \cdot 8\ bits \tag{3.6}$$

Velikost informacije I_{ETX} je v primerjavi z velikostjo celotnega signalizacijskega paketa majhna, v kolikor N_x ni veliko število. Zato je povečanje velikosti informacije pri I_{CANCAR} v primerjavi z velikostjo celotnega signalizacijskega paketa tudi majhna in jo lahko zanemarimo.

Poleg tega mora v postopku CANCAR najbolj obremenjeno vozlišče V_C za vsak preusmerjen prometni tok poslati kratko sporočilo do izvora tega prometnega toka. S tem se izvorno vozlišče obvesti, da mora preusmeriti ta prometni tok na alternativno pot. Če je število preusmerjenih prometnih tokov n_{F_R} in število brezžičnih vozlišč v omrežju N_V, potem je potrebno pri uporabi postopka CANCAR poslati iz najbolj obremenjenega vozlišča naslednje število sporočil:

$$N_{Sporočil,V_C} = n_{F_R} + (N_V - 1) \tag{3.7}$$

Prvi člen n_{F_R} predstavlja kratka sporočila, ki jih je potrebno poslati izvornim vozliščem preusmerjenih prometnih tokov, in je potreben le za postopek CANCAR, medtem ko drugi člen $N_V - 1$ predstavlja sporočila o informaciji za usmerjanje, ki jih je potrebno poslati vsakemu izmed vozlišč v omrežju (razen vozlišču samemu), in je potreben tako pri postopku CANCAR kot pri usmerjanju na podlagi metrike ETX. Za usmerjanje na podlagi metrike ETX mora vsako vozlišče poslati sporočilo za informacijo o usmerjanju do vsakega vozlišča v omrežju, kar pomeni, da se mora preko omrežja prenesti $N_{ETX} = N_V \cdot (N_V - 1)$ sporočil za informacijo o usmerjanju. Enako velja za postopek CANCAR, s to razliko, da mora pri postopku CANCAR najbolj obremenjeno vozliše V_C poslati tudi n_{F_R} kratkih poročil. Število sporočil za informacijo o usmerjanju, ki jih morajo vozlišča poslati pri postopku CANCAR, je torej:

$$N_{CANCAR} = N_V \cdot (N_V - 1) + n_{F_R} = \left(1 + \frac{n_{F_R}}{N_V \cdot (N_V - 1)}\right) \cdot N_{ETX} \tag{3.8}$$

kjer je N_{ETX} število sporočil, ki jih morajo vozlišča poslati pri usmerjanju na podlagi metrike ETX.

V primeru uporabe postopka CANCAR je odstotek povečanja števila izvornih paketov za informacijo o usmerjanju v primerjavi z usmerjanjem na podlagi metrike ETX enako:

$$N_{Povečanje} = \frac{n_{F_R}}{N_V \cdot (N_V - 1)} \tag{3.9}$$

Sporočila za informacijo o usmerjanju se morajo preplaviti preko omrežja iz vsakega vozlišča v omrežju do vsakega vozlišča v omrežju, medtem ko se morajo kratka sporočila poslati le iz najbolj obremenjenega vozlišča V_C do določenega števila (to je n_{F_R}) izvornih vozlišč. Če velja, da je v približku $n_{F_R} \approx N_V$, lahko nekoliko spremenimo shemo usmerjanja in tudi ta podatek pošljemo razpršeno preko omrežja. V takšnem primeru bi usmerjevalna shema razpršeno poslala en izvorni paket iz najbolj obremenjenega vozlišča, v katerem bi bila informacija o preusmerjenih prometnih tokovih, kar bi pomenilo le $1/(N_V \cdot ((N_V - 1))$ odstotek povečanja števila izvornih paketov za usmerjanje s postopkom CANCAR. Če je N_V dovolj veliko, se lahko režijske stroške, ki jih dodatno ustvari postopek CANCAR, ponovno zanemari.

Zgornja analiza ocenjuje celotno število izvornih paketov in celotno število bitov v izvornih paketih, ki predstavljajo režijske stroške pri usmerjanju s postopkom CANCAR. Poleg tega primerja režijske stroške postopka CANCAR in usmerjanja na podlagi metrike ETX. Vendar natančna količina režijskih stroškov predlaganega postopka CANCAR ni enostavno določljiva in je odvisna od uporabljenega načina in tehnike za distribucijo informacije, potrebne za usmerjanje preko omrežja, ki pa sta odvisna tudi od omrežne topologije in prometa v omrežju. Zato je za natančno analizo skalabilnosti postopka

CANCAR potrebna ločena raziskava, kjer se ugotovi, katera tehnika je najučinkovitejša za distribucijo informacije pri različnih konkretnih topologijah in prometnih scenarijih.

V disertaciji želimo ostati na tem mestu splošni in se konkretno ne opredeljujemo do nobene tehnike za distribucijo informacije za usmerjanje preko omrežja. Za analizirane scenarije topologij ter prometnih tokov v omrežju, predstavljene v nadaljevanju, velja, da so režijski stroški postopka CANCAR primerljivi z režijskimi stroški usmerjanja na podlagi metrike ETX, kar opišemo tudi v poglavju 5, kjer ovrednotimo delovanje predlaganega postopka.

3.5 Povzetek

Na podlagi ugotovitev in analize predhodnega dela na področju usmerjanja z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja smo raziskovali statistično informacijo v zvezi z uporabo omrežnega kodiranja in predlagali nov usmerjevalni postopek, imenovan usmerjanje za preprečevanje zasičenja z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja CANCAR (angl. Congestion-Avoidance Network Coding-Aware Routing).
Postopek CANCAR izkorišča informacijo o uspešnosti posameznega prometnega toka pri kodiranju na trenutno najbolj obremenjenem vozlišču v omrežju za učinkovito preusmerjanje dela prometnih tokov in s tem preprečevanje zasičenja vozlišč v ozkih grlih omrežja. V primeru visoko obremenjenih ali zasičenih vozlišč v omrežju postopek določi trenutno najbolj obremenjeno vozlišče in poskuša preusmeriti prometne tokove okoli tega vozlišča. Pri tem postopek CANCAR poskuša preusmeriti tiste prometne tokove, katerih paketi se najslabše kodirajo na trenutno najbolj obremenjenem vozlišču. Po preusmeritvi tokov se lahko paketi ostalih prometnih tokov nadalje kodirajo na tem vozlišču in v njegovi neposredni okoliščini, kar poveča prepustnost v ozkem grlu omrežja. Paketi preusmerjenih tokov pa se lahko morda bolje kodirajo s paketi prometnih tokov v ostalih delih omrežja (stran od najbolj obremenjenega vozlišča). Delovanje postopka CANCAR ni odvisno od uporabljenega omrežno kodirnega algoritma. V naši implementaciji zaradi možnosti primerjave z uveljavljeno rešitvijo uporablja postopek CANCAR za kodiranje paketov omrežno kodirni postopek COPE, lahko pa bi uporabljal tudi katerega izmed drugih omrežno kodirnih postopkov. Podporni mehanizem usmerjanja pri postopku CANCAR temelji na obstoječih tradicionalnih usmerjevalnih postopkih. Za iskanje najkrajših poti uporabimo pri predlaganem CANCAR postopku klasičen Dijkstrov usmerjevalni algoritem z usmerjevalno metriko ETX (De Couto, Aguayo, Bicket, & Morris, 2003).

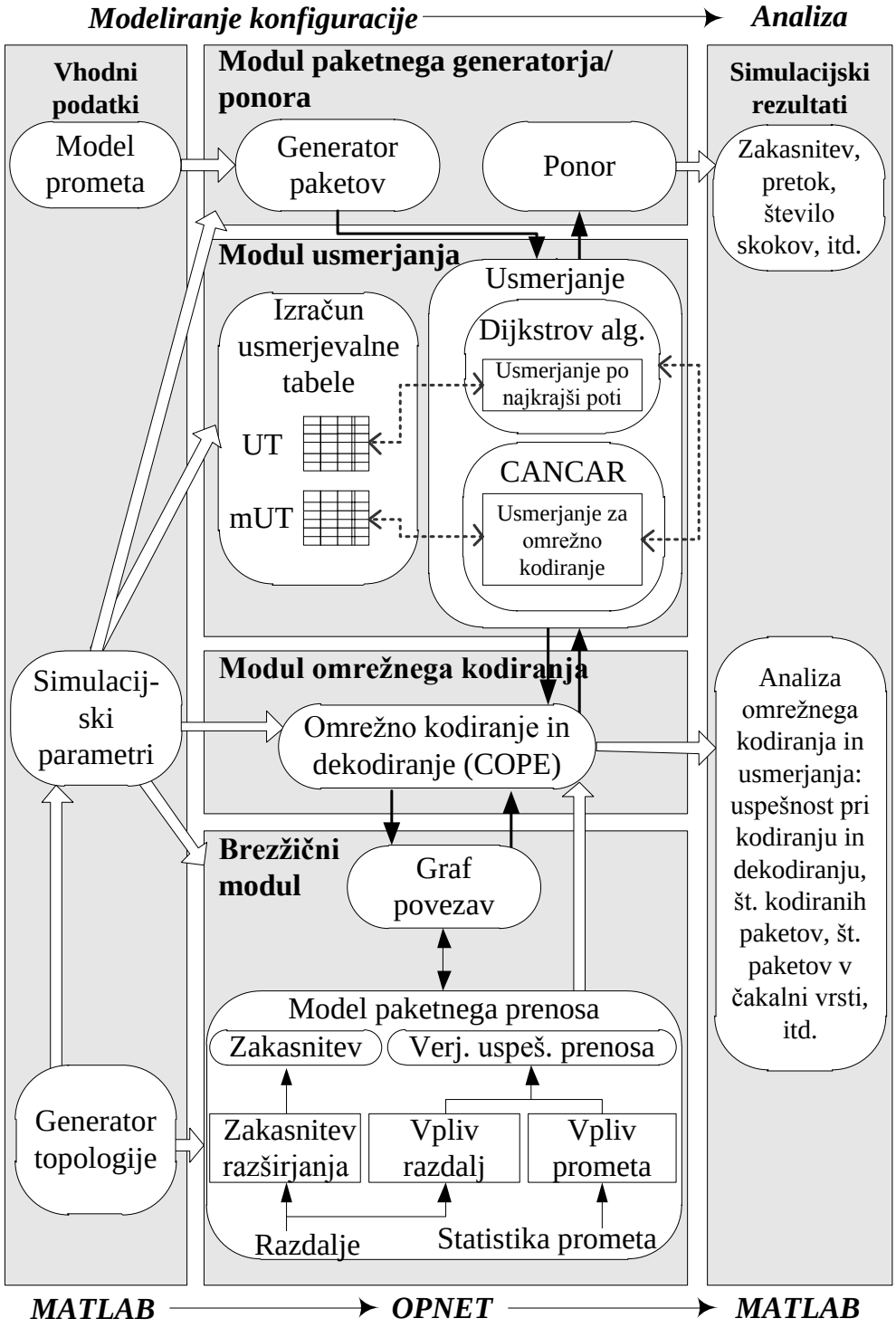
Poglavje 4

Simulacijski model za omrežno kodiranje in usmerjanje

Postopek CANCAR smo implementirali v simulacijski model za omrežno kodiranje in usmerjanje v brezžičnih zankastih omrežjih (Alič, Pertovt, & Švigelj, Simulation environment for network coding, 2011; Alič, Pertovt, & Švigelj, Network coding simulation model in OPNET Modeler, 2012), ki je bil zasnovan s pomočjo simulacijskega orodja OPNET Modeler (OPNET web page, 2014) za analiziranje omrežnega kodiranja in usmerjanja na omrežnem sloju. V tem poglavju predstavimo modularno zasnovo uporabljenega simulacijskega modela za ovrednotenje predlaganega postopka CANCAR. Podrobneje opišemo implementacijo postopka CANCAR v simulacijski model. Za potrebe raziskovanja usmerjanja z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja smo razvili svoj model uspešnosti paketnega prenosa preko brezžičnih povezav za upoštevanje vpliva brezžičnega kanala v brezžičnih zankastih omrežjih. Model predstavimo in ga tudi ovrednotimo.

4.1 Zasnova simulacijskega modela

Simulacijski model za omrežno kodiranje in usmerjanje v brezžičnih zankastih omrežjih zajema vse glavne funkcije omrežij, ki so potrebne za ovrednotenje delovanja usmerjevalnih postopkov. Arhitektura simulacijskega modela je prikazana na sliki 4.1.



Slika 4.1: Arhitektura simulacijskega modela.

Simulacijski model je v osnovi sestavljen iz dveh delov: podpornega generatorja omrežij in prometa, razvitega z orodjem MATLAB, ter glavnega dela simulacijskega modela, razvitega v simulacijskem okolju OPNET.

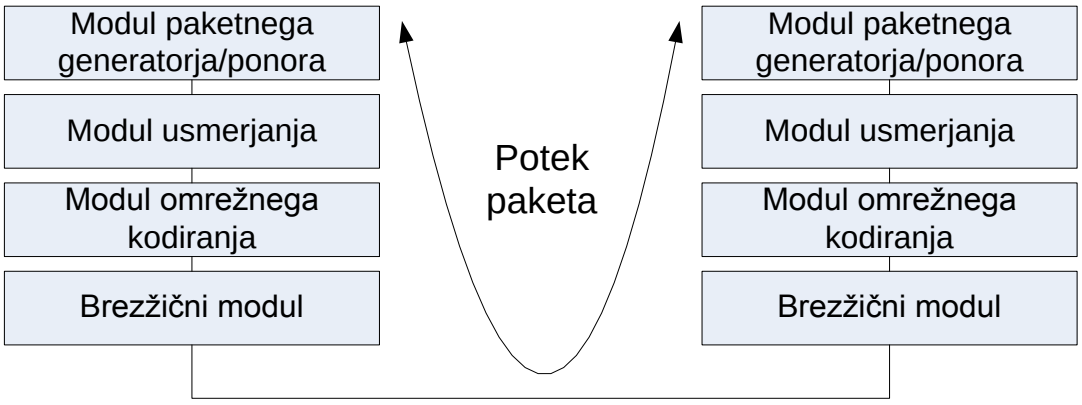
Generator omrežij in prometa zmanjša količino ročnega dela pri vnašanju parametrov omrežja v simulator, saj vsebuje informacijo o topologiji, vozliščih in parametrih protokolnega sklada (na primer prometnega pretoka, število ponovnih pošiljanj, prometne

obremenitve itd.), ki bi jih morali v nasprotnem primeru nastavljati v samem simulatorju, kar je zamudno opravilo. S pomočjo generatorja omrežij in prometa lahko tvorimo naključne brezžične topologije s poljubnim številom naključno razporejenih vozlišč. Vozlišča lahko komunicirajo z različnim številom sosedov. Povezljivost med vozlišči je omogočena na podlagi položajev vozlišč in dosega prenosa vozlišč. Izbrane topologije in parametre se nato vnese v glavni del simulacijskega modela, ki je bil razvit s simulacijskim orodjem OPNET, kjer poteka glavna simulacija.

Glavni del simulacijskega modela predstavlja osrednji del na sliki 4.1. Sestavljen je iz štirih funkcijskih slojev, kar omogoča lažje preučevanje posameznih slojev na številne parametre sistema, ki vplivajo na celotno delovanje omrežja. Modul paketnega generatorja in paketnega ponora je odgovoren za ustvarjanje prometnih obremenitev v omrežju. Pakete generira na izvorih in jih po prenosu preko omrežja sprejme na ponorih. Modul usmerjanja je zadolžen za usmerjanje paketov preko omrežja. V tem modulu je implementiran tudi predlagani usmerjevalni postopek CANCAR. Modul omrežnega kodiranja vsebuje postopke omrežnega kodiranja, ki so zadolženi za kodiranje več paketov v enega. Tukaj je implementiran omrežno kodirni postopek COPE. Brezžični modul poskrbi za uspešen prenos paketov na pravilen naslov skozi ustrezen brezžičen kanal med sosednjimi vozlišči, upoštevajoč različne (spreminjajoče) razmere na brezžični povezavi. V tem modulu je implementiran predlagani model uspešnosti paketnega prenosa preko brezžičnih povezav za upoštevanje vpliva brezžičnega kanala v brezžičnih zankastih omrežjih.

Za zaganjanje simulacij je bil razvit proces avtomatizacije, ki nam olajša in pohitri izvajanje ponavljajočih simulacijskih ciklov. Po končanem procesu simulacijskih ciklov se rezultate simulacij obdela s pomočjo programov, razvitih z orodjem MATLAB, kot je prikazano desno na sliki 4.1.

Na sliki 4.2 je predstavljen potek paketa preko simulacijskega modela. Paket se generira v modulu paketnega generatorja/ponora in nato prenese do modula usmerjanja, kjer se razvrsti v ustrezno izhodno vrsto. Nato se paket lahko kodira z ostalimi paketi v modulu omrežnega kodiranja in posreduje brezžičnemu modulu, ki je odgovoren za prenos paketa preko brezžičnega medija. V tem modulu se s pomočjo modela uspešnosti paketnega prenosa določi, ali je paket pravilno prenesen do sprejemnika ali ne. Na sprejemni strani se uspešno prenesen paket obdela v nasprotnem vrstnem redu kot na oddajni strani.



Slika 4.2: Potek prenosa paketa v simulacijskem modelu za omrežno kodiranje in usmerjanje.

4.1.1 Modul paketnega generatorja/ponora

Modul paketnega generatorja/ponora je odgovoren za ustvarjanje prometa v omrežju. S pomočjo modula lahko ovrednotimo delovanje omrežja v smislu zagotavljanja kvalitete storitev preko merjenja zakasnitev v omrežju in v smislu zagotavljanja kvantitete storitev preko merjenja pretoka omrežja.

V tem modulu se generirajo paketi. Paketi se lahko generirajo poljubno na različnih vozliščih in z različno intenziteto. Uporabimo lahko različne dolžine paketov in porazdelitve časa med generiranimi paketi, kot je eksponentna, enakomerna itd.

Velikost paketa se lahko določi preko ene izmed omogočenih porazdelitev ali preko vektorja, v katerem predstavljajo vrednosti velikosti paketov; pogosteje kot se pojavi v vektorju določena vrednost, večja je verjetnost, da bo paket enak velikosti te vrednosti.

Modul podpira različne porazdelitve prometa v omrežju. Promet se lahko porazdeli po celotnem omrežju, torej se generira na vseh vozliščih in je lahko naslovljen na vsa vozlišča v omrežju. Intenziteta prometa je lahko poljubno nastavljena na vsakem vozlišču posebej. Drugi način določanja porazdelitve prometa je preko kvadratne matrike. Velikost matrike je enaka številu vozlišč v omrežju. Vsota vseh vrednosti v matriki je enaka ena in predstavlja normiran celoten promet v omrežju. Vrednost v n-ti vrstici in m-tem stolpcu opisuje delež celotnega prometa v omrežju, ki je generiran med vozliščem n in vozliščem m.

Po prenosu paketa preko omrežja modul poskrbi za sprejem paketa na njegovem ponoru. Za vsak paket se lahko poljubno določi njegov ponor izmed vseh vozlišč v omrežju.

4.1.2 Modul usmerjanja

Modul usmerjanja skrbi za dinamično usmerjanje paketov preko omrežja. S pomočjo informacije v glavi paketa modul na izvornem in vmesnih vozliščih določa, kateremu sosedu posredovati paket na poti do ponora.

Modul vsebuje različne dinamične in prilagodljive usmerjevalne funkcije. S pomočjo teh funkcij je mogoče izvajati usmerjanje, ki se zaveda uporabe priložnosti za kodiranje ob uporabi omrežno kodirnih postopkov v omrežju, lahko pa se uporabijo tudi osnovni usmerjevalni postopki. V tem modulu so implementirani usmerjevalni algoritmi, ki vsebujejo nove koncepte usmerjanja. Koncepti so optimizirani na podlagi temeljnih značilnosti omrežnega kodiranja. Predlagan usmerjevalni postopek CANCAR je bil implementiran v ta modul.

Pri usmerjanju paketov se v osnovi uporablja tradicionalni Dijkstrov usmerjevalni algoritem za iskanje najkrajših poti na podlagi izbrane usmerjevalne metrike. Na podlagi tako določenih poti se nato v tem modulu zgradijo usmerjevalne tabele. Vozlišča uporabljajo usmerjevalne tabele za določanje naslednjega skoka paketa na vmesnih vozliščih na poti skozi omrežje.

Za usmerjevalno metriko se lahko izbere razdalja med vozlišči, število skokov na poti v omrežju ali metrika ETX, ki temelji na verjetnosti uspešnega prenosa.

4.1.3 Modul omrežnega kodiranja

V tem modulu so implementirani postopki omrežnega kodiranja. Tukaj se nahaja omrežno kodirni postopek COPE.

Modul omrežnega kodiranja ima dve glavni funkciji. Prva funkcija je kodiranje čim več paketov N v en sam paket. Izbira paketov za kodiranje poteka s pomočjo postopka COPE.

Druga funkcija modula je dekodiranje sprejetih paketov. Po sprejemu paketa poskuša modul dekodirati paket. Uspešnost dekodiranja je odvisna od vsebine paketa in paketov, ki jih modul že ima. Modul mora predhodno poznati vsaj N-1 paketov, ki so bili združeni v kodiran paket. Če vozlišče lahko dekodira kodiran paket, shrani vse dekodirane pakete za potrebe kasnejšega dekodiranja, usmerjevalnemu sloju pa posreduje le paket, katerega naslov prejemnika ustreza danemu vozlišču.

V primeru, da modul ne uspe dekodirati kodiranega paketa, ga zavrže in čaka na ponovno pošiljanje paketa s strani pošiljatelja.

4.1.4 Brezžični modul

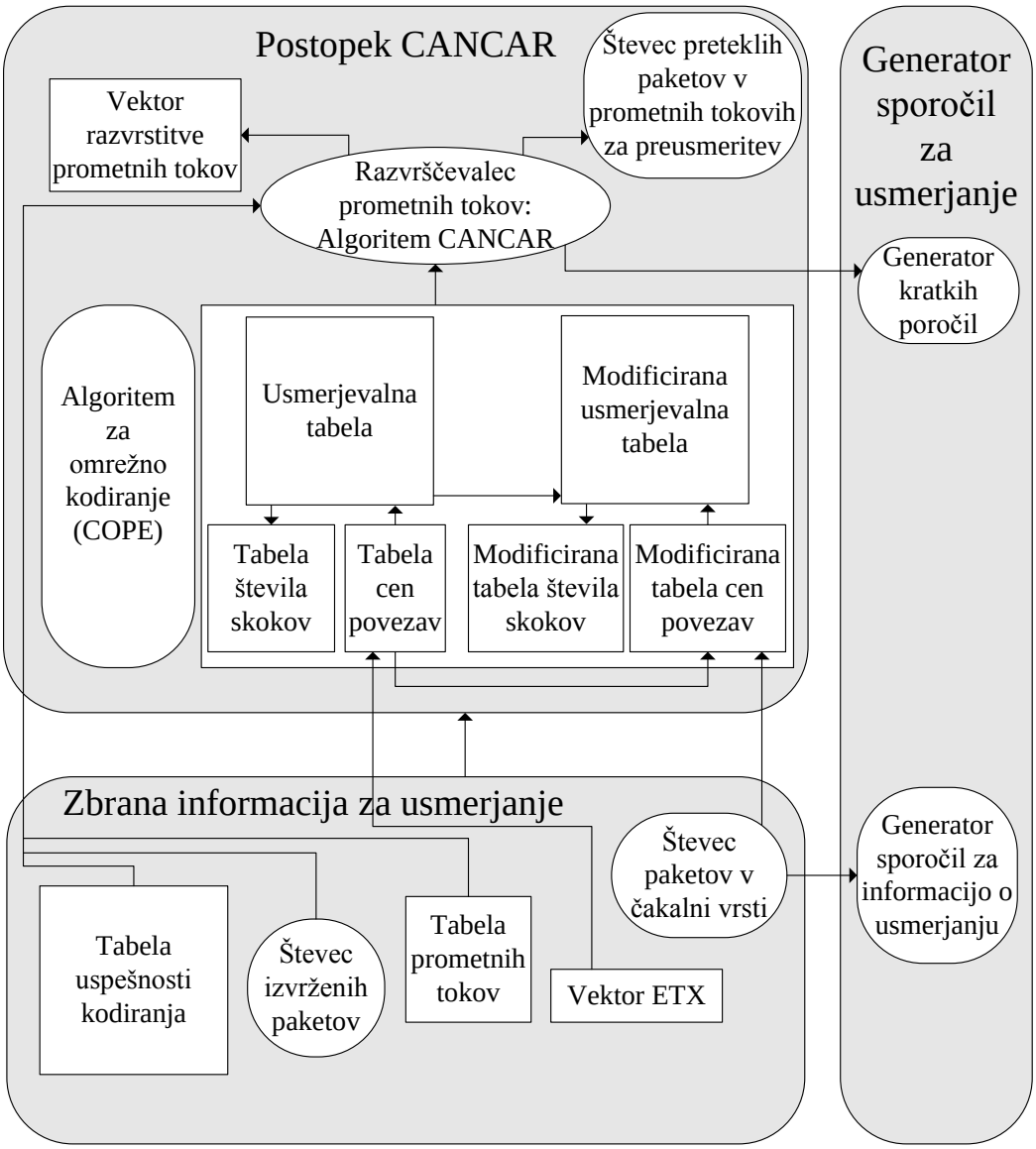
Brezžični modul skrbi za uspešno prenašanje paketov skozi brezžični kanal med sosednjimi vozlišči s pomočjo modela uspešnosti paketnega prenosa, upoštevajoč pogoje na posamezni brezžični povezavi. S pomočjo uporabe potrditev uspešnega prenosa omogoča prenos tudi v primeru brezžičnih povezav z izgubami. Tukaj se nahaja tudi graf povezav, ki določa celotno omrežno topologijo. Topologija se določi na podlagi generatorja omrežij.

Modul omogoča uporabo mehanizma oddajanja enemu sprejemniku, kjer vozlišče, ki je prejemnik paketa, potrdi uspešen prenos s potrditvenim sporočilom. Poleg tega načina omogoča modul še mehanizem, ki povečuje učinek uporabe omrežnega kodiranja.

Mehanizem se imenuje psevdo razpršeno pošiljanje in je bil razvit pri omrežno kodirnem postopku COPE (Katti, Rahul, Hu, Katabi, Médard, & Crowcroft, 2008). Pakete, ki so namenjeni za pošiljanje s pomočjo uporabe mehanizma za razpršeno pošiljanje, pošilja mehanizem z načinom oddajanja enemu sprejemniku. Polje destinacije se nastavi na MAC naslov enega od nameravanih prejemnikov kodiranega paketa; to je naslovnik enega od paketov v kodiranem paketu. Ker vsa vozlišča poslušajo vse prenose, lahko prestrežejo tudi tiste pakete, ki jim niso namenjeni. Ko vozlišče sprejme paket z naslovom MAC v polju destinacije, ki je enak naslovu vozlišča, pošlje to vozlišče pošiljatelju paketa potrditveno sporočilo. Ne glede na naslov naslednjega skoka v kodiranem paketu se posreduje ta paket do modula omrežnega kodiranja, ki preveri, ali je kodiran paket namenjen vozlišču (tj. ali je eden izmed paketov v kodiranem paketu namenjen vozlišču). V kolikor je eden izmed paketov v kodiranem paketu namenjen vozlišču, pošlje vozlišče potrditev o uspešno prejetem in dekodiranem paketu.

4.2 Implementacija usmerjevalnega postopka CANCAR v simulacijski model

V tem poglavju so predstavljene podrobnosti implementacije usmerjevalnega postopka CANCAR v simulacijski model v simulacijskem okolju OPNET Modeler. Pri dejanski implementaciji se postopek CANCAR izvaja na vsakem vozlišču v omrežju. Blok shema implementacije postopka CANCAR je predstavljena na sliki 4.3. Vsak blok v shemi podrobneje opišemo v nadaljevanju.



Slika 4.3: Blok shema implementacije postopka CANCAR.

Za zbiranje podatkov, ki so potrebni za postopek usmerjanja CANCAR, smo implementirali različne podatkovne strukture. Vsaka od predstavljenih podatkovnih struktur se nahaja na vsakem vozlišču v omrežju. Podatki se zbirajo za vsak opazovan časovni interval posebej in se uporabijo za naslednji interval posodobitve usmerjevalnih tabel. Na začetku opazovanega časovnega intervala ponastavimo vse vrednosti v podatkovnih strukturah na privzete vrednosti (običajno je to vrednost nič). Nato začnemo z zajemanjem podatkov opazovanega intervala, kar poteka do posodobitve usmerjevalnih tabel.

V vektorju ETX so izračunane vrednosti metrike ETX za vsako obstoječo brezžično povezavo posameznega vozlišča. Za vsako vozlišče v omrežju obstaja en vektor ETX. ETX metrika se izračuna po enačbi (2.1) na podlagi meritev verjetnosti uspešnega prenosa podatkov preko brezžičnih povezav v obe smeri. Verjetnosti uspešnega prenosa se izračunajo v simulaciji s pomočjo enačbe (4.1) (glej tudi sliko 2.4):

$$d_{ij} = \frac{R_{ij}}{S_{ij}} \tag{4.1}$$

R_{ij} je število uspešno prejetih paketov v vozlišču V_j v opazovanem časovnem intervalu, poslanih iz vozlišča V_i. S_{ij} je število vseh paketov, poslanih iz oddajnega vozlišča V_i do sprejemnega vozlišča V_j v opazovanem intervalu.

Na podlagi vseh vektorjev ETX se zgradi tabela cen brezžičnih povezav. Ta tabela je kvadratna; število stolpcev in vrstic v tabeli je enako številu vseh vozlišč v omrežju. Vrednost v *n*-ti vrstici in *m*-tem stolpcu predstavlja ceno povezave med vozliščem V_n in vozliščem V_m. Tabela torej vsebuje vrednosti cen vseh obstoječih povezav v omrežju. Tabela cen povezav se uporabi za izračun usmerjevalne tabele in tabele števila skokov s pomočjo Dijkstrovega usmerjevalnega algoritma. Obe tabeli sta enakih dimenzij kot tabela cen povezav. Vrednost v *n*-ti vrstici in *m*-tem stolpcu usmerjevalne tabele predstavlja sosednje vozlišče, ki mu mora vozlišče V_n poslati paket, v primeru da predstavlja vozlišče V_m za dani paket končno destinacijo. Vrednost v *n*-ti vrstici in *m*-tem stolpcu tabele števila skokov pa pove, koliko vmesnih povezav je na poti med vozliščema V_n in V_m.

V simulacijskem modelu imamo za vsak tip tabele le eno centralno tabelo, saj predpostavimo, da imamo popolnoma sinhronizirano omrežje in s tem tudi usmerjanje. V realnem okolju bi imeli na vsakem vozlišču za vsak tip tabele po eno tabelo. S problemom asinhronosti usmerjanja v realnih omrežjih se v okviru doktorske disertacije ne ukvarjamo. Ta je odvisna od hitrosti razpošiljanja informacije o usmerjanju ter uporabljenega načina sinhronizacije omrežja.

Števec paketov v čakalni vrsti vsebuje informacijo o povprečnem številu paketov v čakalni vrsti vozlišča. Na podlagi te vrednosti lahko določimo najbolj obremenjeno vozlišče v omrežju in določimo modificirano tabelo cen povezav s pomočjo tabele cen povezav in definicije 3.1 v poglavju 3.2.3.2 za izračun alternativnih poti. Nato lahko izračunamo modificirano usmerjevalno tabelo in modificirano tabelo števila skokov na podlagi modificirane tabele cen povezav. Povprečno število paketov v čakalni vrsti vozlišča V_x se izmeri v opazovanem časovnem intervalu in izračuna, kot podaja enačba (4.2):

$$\bar{q}_x = \frac{\sum_u q_{x,u} \cdot \Delta t_u}{T_M} \tag{4.2}$$

Opazovani časovni interval za določitev povprečnega števila paketov v čakalni vrsti je označen kot T_M. Poudariti je potrebno, da je lahko čas T_M manjši ali enak času intervala posodobitve usmerjevalnih tabel, ki ga označimo s T_R ($T_M \leq T_R$). Δt_u je krajši zaporedni časovni interval u ($u = 1,2,3, \ldots$) znotraj intervala T_M in označuje časovno razliko med prihodom dveh paketov v čakalno vrsto vozlišča ($\Delta t_u \ll T_M$). $q_{x,u}$ je (konstantno) število paketov v čakalni vrsti vozlišča V_x v časovnem intervalu Δt_u.

Tabela prometnih tokov je enake velikosti kot ostale tabele. V njej se nahaja informacija o številu paketov v vsakem obstoječem prometnem toku skozi dano vozlišče. To informacijo potrebuje algoritem CANCAR, da pri preusmerjanju prometnih tokov ugotovi, kateri prometni tokovi gredo skozi trenutno najbolj obremenjeno vozlišče v omrežju in koliko paketov je v posameznem prometnem toku.

V tabeli uspešnosti kodiranja se izračuna delež kodiranih paketov v vsakem obstoječem prometnem toku na vozlišču. Za vsak možen par izvor-ponor v omrežju obstaja en vnos v tabeli. Pri dejanskem usmerjanju se za razvrstitev prometnih tokov glede na uspešnost pri kodiranju ob vsaki posodobitvi usmerjevalnih tabel uporabi le tabela uspešnosti kodiranja, ki pripada trenutno najbolj obremenjenemu vozlišču v omrežju. Delež kodiranih paketov v prometnem toku F_{xl} na vozlišču V_x je izračunan na podlagi enačbe (4.3):

$$p_{x,F_{xl}} = \frac{C_{x,F_{xl}}}{R_{x,F_{xl}}} \tag{4.3}$$

$C_{x,F_{xl}}$ je število kodiranih paketov v danem prometnem toku na vozlišču V_x. $R_{x,F_{xl}}$ je število paketov v danem prometnem toku, ki gre skozi vozlišče V_x. Ta informacija je dostopna v tabeli prometnih tokov.

V števcu izvrženih paketov se nahaja število izvrženih paketov iz čakalne vrste vozlišča. V števcu preteklih paketov v prometnih tokovih, izbranih za preusmeritev, pa je število prejetih paketov v prometnih tokovih, ki so bili na trenutno najbolj obremenjenem vozlišču že izbrani za preusmeritev na alternativne povezave. S pomočjo teh podatkov lahko algoritem CANCAR določi, koliko prometnih tokov mora preusmeriti za prometno razbremenitev najbolj obremenjenega vozlišča.

Algoritem CANCAR je jedro usmerjevalnega postopka CANCAR in se zažene ob vsakem intervalu posodobitve usmerjevalnih tabel le na trenutno najbolj obremenjenem vozlišču v omrežju. V vektorju razvrstitve prometnih tokov so razvrščeni prometni tokovi, ki gredo skozi trenutno najbolj obremenjeno vozlišče, od najmanj kodiranega do najbolj kodiranega prometnega toka. V kodirnem algoritmu se nahaja omrežno kodirni postopek COPE. Tukaj bi lahko bili implementirani tudi drugi omrežno kodirni postopki, ki temeljijo na postopku COPE.

Za usmerjanje mora postopek CANCAR poslati eno sporočilo iz vsakega vozlišča do vsakega vozlišča v omrežju. Ta sporočila se generirajo v generatorju sporočil za informacijo o usmerjanju. Poleg tega pa mora najbolj obremenjeno vozlišče poslati kratko poročilo do vsakega izvornega vozlišča preusmerjenega prometnega toka. Kratka poročila se generirajo v generatorju kratkih poročil.

4.3 Modeliranje paketnega prenosa preko brezžičnih povezav v simulacijskem modelu

Deljena uporaba skupnih virov, interferenca drugih sistemov ali oddajnikov in slabljenje pri razširjanju lahko privedejo do izgub pri prenosu signala v brezžičnem prostoru, ki se v nižjih slojih odražajo kot izgubljeni biti ali okvirji, brez uporabe primernega mehanizma za odpravljanje napak pa tudi kot izgubljeni paketi na omrežnem sloju. Izguba paketov v omrežju vpliva na kakovost delovanja različnih tehnik v omrežnem sloju, zato jo je potrebno pri raziskovanju s pomočjo simulacij ustrezno upoštevati. V simulacijskem modelu smo za slednje zasnovali nov model uspešnosti paketnega prenosa preko brezžične povezave v brezžičnem zankastem omrežju.

Za modeliranje lastnosti brezžičnega kanala je praviloma potrebno ovrednotiti različne vplive v obliki dinamičnih sprememb na kanalu (Yeung, Takai, & Bagrodia, 2005). Nekatere pojave v brezžičnem kanalu je precej zapleteno modelirati, saj je njihov dinamični vpliv težko določljiv. Modeli potrebujejo natančno informacijo o okoljskih parametrih, kot so oblika terena, ovire, pogoji pri razširjanju (Athanasiadou, Wassell, & Hong, 2004; Chatzigiannakis, Mylonas, & Nikoletseas, 2007; Newport, Kotz, Yuan, Gray, Liu, & Elliott, 2007), itd. Ta informacija ni dostopna v avtomatsko naključno generiranih omrežjih, ki so primerna za ovrednotenje delovanja različnih omrežnih arhitektur v dogodkovnih simulatorjih. Prav tako je za natančno analizo prenosa paketa v dogodkovnih omrežnih simulatorjih potrebna visoka računska zmogljivost zaradi uporabe različnih tehnik na fizičnem in povezavnem sloju (Hamida, Chelius, & Gorce, 2009).

Obstoječi modeli brezžičnih povezav so s stališča računske zahtevnosti in dinamičnega spreminjanja pogojev na brezžičnih povezavah manj primerni (Hu & Hou, 2005; Baras, Papageorgiou, Tabatabaee, Shang, & Rentz, 2007; OPNET web page, 2014). Zato smo zasnovali nov model za upoštevanje vpliva dinamičnega izgubnega brezžičnega okolja na omrežnem sloju v obliki verjetnosti uspešnega prenosa paketov. Poudarek modela je na generiranju čim manjšega števila simulacijskih dogodkov in upoštevanju odvisnosti uspešnega prenosa paketov od lokalnih prometnih razmer in razdalj med vozlišči ter od zakasnitev paketov. S tem je model še posebno primeren za uporabo pri raziskavah in ovrednotenju delovanja usmerjevalnih postopkov, tehnik prometnega inženiringa ter postopkov omrežnega kodiranja v obsežnih visoko obremenjenih omrežjih s pomočjo dogodkovnih simulatorjev, kjer je v postopkih potrebno upoštevati tudi vpliv brezžičnega medija na uspešnost prenosa paketov.

4.3.1 Modeliranje brezžične povezave v omrežnih simulatorjih

V brezžičnih omrežjih je brezžični signal pod vplivom slabljenja na poti, senčenja, šuma ozadja, odbojev, razširjanja po več poteh in interference drugih oddajnikov. Vsi ti učinki lahko vplivajo na presih, slabljenje in popačenje oddajnega signala, kar rezultira v izgubi bitov in paketov ter posledično zmanjšanje podatkovne hitrosti in pretoka v omrežju (Hamida, Chelius, & Gorce, 2009). Ker se lahko vsi ali nekateri od teh učinkov s časom hitro spreminjajo, se smatra, da je brezžični kanal izjemno dinamičen (Yeung, Takai, & Bagrodia, 2005).

Zgoraj navedene vplive na signal se lahko predstavi s pomočjo različnih simulacijskih modelov. Izbira modela kanala je odvisna od simulacijskih zahtev (Reddy & Riley, 2007): natančnosti simulacije, simulacijskega časa, predmeta raziskave, velikosti preiskovanega omrežja, itd.

4.3.2 Empirični model uspešnosti paketnega prenosa preko brezžične povezave

Za ovrednotenje delovanja postopkov na omrežnem sloju običajno zadošča, da upoštevamo le ključne vplive in lastnosti brezžičnega kanala (Newport, Kotz, Yuan, Gray, Liu, & Elliott, 2007; Hu & Hou, 2005) in ne natančne karakterizacije in ocenjevanja različnih pojavov na brezžičnem kanalu. Zaradi računske zahtevnosti naj bi bili vidiki fizične plasti v omrežnih simulatorjih abstrahirani od podrobnosti do karakterizacije le tistih pojavov, ki imajo pomemben vpliv na parametre višjih slojev, kot so zakasnitev, pretok in verjetnost uspešnega prenosa. Vendar mora izvedena abstrakcija še vedno zagotavljati verodostojnost simulacijskih rezultatov.

Predlagani model uspešnosti paketnega prenosa temelji na abstrakciji obnašanja realnega brezžičnega prenosa na podlagi verjetnosti uspešnega prenosa paketa med pari vozlišč. Predpostavke o med-vozliščnih verjetnostih uspešnega prenosa temeljijo na predhodnem poznavanju obnašanja brezžičnega okolja ter statistiki in meritvah iz realnega brezžičnega okolja. Model je zgrajen na podlagi upoštevanja zaključkov iz meritev brezžičnih povezav v realnem delovnem okolju, kot predlagano tudi v (Liu, in drugi, 2005). To omogoča, da je naš simulacijski model manj kompleksen ter pomaga bistveno zmanjšati število simulacijskih dogodkov, ki se generirajo pri vsakem prenosu paketa. S tem model zmanjša zahteve po računski moči in skrajša potreben simulacijski čas, pri čemer pa ne zanemari niti ne popači vpliva brezžičnega okolja na predmet raziskave.

Z razliko od obstoječih modelov brezžičnih povezav predlagani model popolnoma abstrahira učinke brezžičnega kanala kot tudi tehnik na fizičnem in povezavnem sloju v model uspešnosti paketnega prenosa, ki je primeren za simulacijski model na omrežnem nivoju v paketni domeni (Wehrle, Gunes, & Gross, 2010).

4.3.2.1 Predpostavke pri modelu

V literaturi obstajajo različne študije brezžičnih kanalov na nivoju povezav, ki temeljijo na podlagi meritev. Med drugim je v (Wu & Biaz, 2011) predstavljen celovit pregled tega področja. Predlagani model uspešnosti paketnega prenosa temelji na podlagi meritev na nivoju povezav v urbanem zankastem omrežju Roofnet (Aguayo, Bicket, Biswas, Judd, & Morris, 2004) z 38 vozlišči, ki uporabljajo protokol 802.11b. V omrežju Roofnet so bili analizirani vzroki izgub paketov v zunanjem večetapnem omrežju v urbanem okolju.

Avtorji v (Aguayo, Bicket, Biswas, Judd, & Morris, 2004) ugotavljajo, da je distribucija med-vozliščnih verjetnosti uspešnega prenosa paketov relativno enakomerna. To pomeni, da ne obstajajo samo slabe ali dobre brezžične povezave (kot znano iz nekatere literature (Kotz, Newport, & Elliott, 2003)), ampak tudi povezave z vmesnimi vrednostmi verjetnosti uspešnega prenosa. Poleg tega ima večina povezav relativno stabilne izgube skozi daljši časovni interval. Izgube povezav ni mogoče določiti le na podlagi razmerja signal/šum (SNR) na sprejemnem vozlišču in razdalje med pari vozlišč. Potrebno je tudi upoštevati ovire v delovnem okolju, različne višine anten in presih zaradi razširjanja signala po več poteh. Slednje ima pomembno vlogo pri napovedovanju izgub na povezavah v okoljih brezžičnih omrežij, kjer so razdalje med pari vozlišč relativno velike, saj je namreč glavni krivec za obstoj velikega števila povezav z vmesnimi izgubami.

V predlaganem modelu uspešnosti paketnega prenosa preko brezžičnih povezav abstrahiramo pojave v brezžičnem okolju (predstavljene v zgornjem odstavku) na način,

da odraža model še vedno učinek (oziroma obnašanje) brezžičnih povezav v realnem okolju. V modelu ne modeliramo vsakega posameznega vpliva kanala na prenos paketa posebej, saj nam za vrednotenje delovanja novega postopka dinamičnega usmerjanja z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja zadošča upoštevanje časovnega spreminjanja verjetnosti uspešnega prenosa paketov med pari vozlišč. S tem ustvarimo v simulaciji dinamične razmere v omrežju, ki jih potrebujemo za raziskovanje omrežnega kodiranja in usmerjanja.

Modelirane dinamične razmere v omrežju temeljijo na dinamičnem obnašanju brezžičnega omrežja. Učinke na prenos paketa določimo z neposredno dodelitvijo stopnje paketne napake na posamezni brezžični povezavi v avtomatično generiranih naključnih omrežjih na podlagi empiričnih meritev iz realnega brezžičnega zankastega omrežja.

4.3.2.2 Opis modela

Predlagani model uspešnosti paketnega prenosa preko brezžične povezave v paketni domeni za vsako brezžično povezavo med določenim parom vozlišč modelira zakasnitev paketov in verjetnost uspešnega prenosa paketov. Verjetnost uspešnega prenosa med pari vozlišč je v modelu prilagojena empiričnim meritvam in statistični analizi izgub na povezavah med pari vozlišč v postavljenem realnem brezžičnem omrežju (kot tudi predlagano v (Liu, in drugi, 2005)) s protokolom 802.11b, objavljenih v Roofnet (Aguayo, Bicket, Biswas, Judd, & Morris, 2004; Bicket, Aguayo, Biswas, & Morris, 2005).

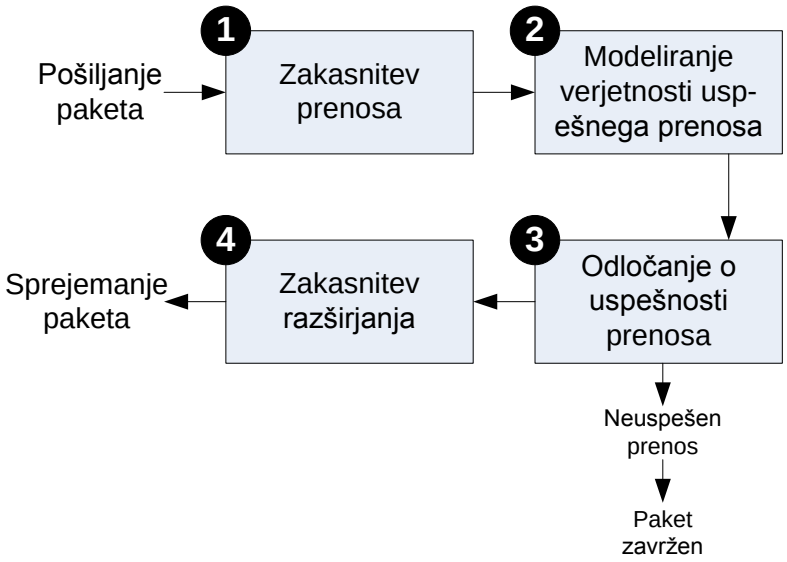
V modelu smo verjetnost uspešnega paketnega prenosa upoštevali preko dveh faktorjev. Prvi faktor upošteva razdalje med pari vozlišč, drugi faktor pa lokalne prometne razmere.

Parametri modela so v nadaljevanju nastavljeni za uporabo v prometno bolj obremenjenih ali zasičenih omrežjih, saj so takšni primeri najbolj zanimivi s stališča raziskovanja in ovrednotenja delovanja usmerjevalnih postopkov za omrežno kodiranje. Pri takšnih obremenitvah so namreč koristi uporabe omrežnega kodiranja v omrežju največje. Prav tako pa so pri takšnih obremenitvah največje koristi uporabe predlaganega modela.

Za raziskovanje postopkov na omrežnem sloju je potrebno poznati verjetnosti uspešnega prenosa paketa med dvema vozliščema na vsakem skoku v omrežju. Te verjetnosti odločilno vplivajo na delovanje postopkov omrežnega kodiranja in usmerjanja (Chi, Jianf, & Horiguchi, 2008).

Pri uporabi omrežnega kodiranja v brezžičnih omrežjih se velike prometne obremenitve v kombinaciji z običajnimi karakteristikami brezžičnih povezav, kot je interferenca od ostalih oddajnikov, trki paketov zaradi uporabe istega kanala in slabljenje pri razširjanju, odražajo kot večja verjetnost izgube paketa. Zato lokalne prometne razmere vplivajo na porazdelitev vrednosti verjetnosti uspešnega prenosa na povezavah v omrežju tako, da so najslabše razmere na povezavah okrog ozkega grla omrežja, medtem ko so velike verjetnosti uspešnega prenosa na robovih omrežja z majhnimi prometnimi obremenitvami. Dinamične spremembe izgube paketov preko časovnega spreminjanja verjetnosti uspešnega prenosa drastično vplivajo na delovanje postopkov omrežnega kodiranja in usmerjanja (Chi, Jianf, & Horiguchi, 2008). Podobne razmere nastanejo tudi v realnem scenariju.

V nadaljevanju opišemo vplive predlaganega modela na brezžični prenos paketa v štirih zaporednih fazah, ki so prikazane na sliki 4.4. Glavni doprinos modela predstavlja 2. faza.



Slika 4.4: Faze modela uspešnosti paketnega prenosa preko brezžične povezave.

4.3.2.2.1 1. faza: Zakasnitev prenosa Zakasnitev prenosa paketa T_T se izračuna na podlagi enačbe (4.4):

$$T_T = b_z/C \tag{4.4}$$

kjer je b_z dolžina paketa z in C je prenosna hitrost brezžičnega vozlišča.

4.3.2.2.2 2. faza: Modeliranje verjetnosti uspešnega prenosa paketa Modelirane verjetnosti uspešnega prenosa paketa med pari vozlišč predstavljajo delež izgubljenih paketov (PER). Ta vpliv je prilagojen empirično pridobljenim meritvam v Roofnet omrežju (Aguayo, Bicket, Biswas, Judd, & Morris, 2004).

V predlaganem modelu verjetnost uspešnega prenosa paketa preko brezžične povezave med vozliščema R_i in R_j, označene z P_{ij}, izračunamo s pomočjo enačbe (4.5):

$$\mathrm{P_{ij}(t_k) = p_{d,ij} \cdot p_{t,ij}(t_k)} \tag{4.5}$$

Parameter $p_{d,ij}$ predstavlja vpliv na verjetnost uspešnega prenosa med paroma vozlišč R_i in R_j, ki je odvisna od razdalje med vozliščema. Pri tem se običajno upošteva, da ima brezžična povezava tri območja glede na verjetnost sprejema paketov (Baccour, in drugi, 2012), območje dobre povezave z nizko verjetnostjo napak pri prenosu paketov, prehodno območje, kjer se verjetnost napak pri prenosu paketov s časom in majhno spremembo lokacije močno spreminja, ter območje slabe ali porušene povezave brez uspešno prenesenih paketov. Za modeliranje je najbolj problematično prehodno območje, kjer verjetnost napak pri prenosu paketov v povprečju zavzema vrednosti med 0.9 in 0.1. To območje smo zajeli že v določitvi topologije omrežja s tem, ali je med določenim parom vozlišč sploh možno vzpostaviti povezavo z veliko verjetnostjo uspešnega prenosa paketov zaradi same razdalje, kot zahtevajo postopki omrežnega kodiranja, ali ne. Za razdalje v prehodnem območju smo torej predvideli, da so že izven dosega. Ker tudi v območju dobre povezave običajno zasledimo različne verjetnosti napačno prenesenih paketov, smo uvedli odvisnost verjetnosti napake v tem območju od razdalje med pari vozlišč. Tako je $p_{d,ij}$ izračunana z enačbo (4.6) kot:

$$\mathrm{p_{d,ij}} = \mathrm{p_{d,max}} - \frac{\mathrm{p_{d,max}} - \mathrm{p_{d,min}}}{\mathrm{d_{max}} - \mathrm{d_{min}}} \cdot (\mathrm{d_{ij}} - \mathrm{d_{min}}) \tag{4.6}$$

d_{ij} je razdalja med parom vozlišč, d_{min} je najkrajša razdalja med parom vozlišč v omrežju in d_{max} je najdaljša razdalja med parom vozlišč v omrežju znotraj območja dobre povezave. $p_{d,max}$ in $p_{d,min}$ sta vhodna parametra. $p_{d,max}$ je največja možna verjetnost uspešnega prenosa v omrežju, odvisna od razdalje, in je dodeljena paru vozlišč z najkrajšo medsebojno razdaljo v omrežju, medtem ko je $p_{d,min}$ najmanjša možna verjetnost zaradi razdalje in je dodeljena paru vozlišč z najdaljšo medsebojno razdaljo v omrežju znotraj območja dobre povezave. $p_{d,ij}$ predstavlja verjetnost uspešnega prenosa med pari vozlišč zaradi razdalje, ki se odraža v manjši $p_{d,ij}$ za daljše razdalje med R_i in R_j ter obratno.

Parameter $p_{t,ij}$ v enačbi (4.5) predstavlja vpliv na verjetnost uspešnega prenosa med paroma vozlišč R_i in R_j, ki je odvisna od prometne obremenitve. Ta verjetnost je odvisna od števila paketov, poslanih iz sosednih vozlišč na sprejemno vozlišče R_j, razen paketov, poslanih iz oddajnega vozlišča R_i na sprejemno vozlišče R_j, kot je to prikazano na sliki 4.5. Predpostavljamo, da vsa vozlišča oddajajo na istem kanalu. Vozlišča so označena z $R_n = \{R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_j, \dots, R_N\}$. Sosedna vozlišča sprejemnika R_j so R_n, kjer velja $n \neq j$, in so označena z R_{-j}. Neposredna brezžična povezava med vsakim parom vozlišč je prikazana s pomočjo puščic. Ostala vozlišča v omrežju in poslani paketi na njih nimajo nobenega vpliva na dano verjetnost uspešnega prenosa $p_{t,ij}$.

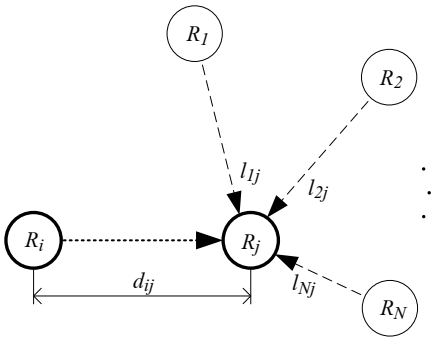
$p_{t,ij}$ se spreminja ob časih $t_k = t_o + k \cdot \Delta t$. t_o je čas, ob katerem začnemo generirati pakete v simulacijskem ciklu. $k = 1,2, \dots$ je pozitivno celo število, ki narašča preko simulacijskega cikla. Δt je časovni interval, v katerem je izmerjeno število poslanih paketov. Z drugimi besedami, $p_{t,ij}$ je linearno odvisen od prihajajočega števila paketov na sprejemnik R_j, poslanih iz sprejemnikovih sosedov R_{-j}, brez upoštevanja poslanih paketov iz oddajnega vozlišča R_i, med okenskim intervalom Δt pred časom t_k, to je med t_{k-1} in t_k. Izračunan je s pomočjo enačbe (4.7):

$$\mathrm{p_{t,ij}(t_k)} = \mathrm{p_{t,ij}(t_o + k \cdot \Delta t)} = 1 - \lambda \cdot \frac{\mathrm{L_{ij}(t_k)}}{\Delta \mathrm{t} \cdot \mathrm{C}} \tag{4.7}$$

kjer je L_{ij} vsota vseh bitov poslanih iz sosednjih vozlišč R_{-j}, razen vozlišča R_i, na sprejemno vozlišče R_j med opazovanim časovnim intervalom Δt. C je prenosna hitrost brezžičnega vozlišča. Parameter λ je uporabljen za opis jakosti vpliva L_{ij} na rezultat $p_{t,ij}$. Vsoto bitov na vozlišče R_j lahko izrazimo z enačbo (4.8):

$$\mathrm{L_{ij}(t_k)} = \sum_{\mathrm{n}} \mathrm{l_{nj}(t_k)} = \sum_{\mathrm{n}} \sum_{\mathrm{z=1}}^{\mathrm{h_{njk}}} \mathrm{b_{njz}} \tag{4.8}$$

kjer je $n \in \{1,2, \dots, N\}$ in $n \neq i, j$. l_{nj} je vsota vseh bitov, poslanih iz sosedov R_n na sprejemnik R_j med intervalom Δt. z je paket, poslan iz R_n na R_j med intervalom Δt, in b_{njz} je število bitov v paketu z.



Slika 4.5: Izračun vsote vseh poslanih bitov iz sosednjih vozlišč $R_{_j}$ na vozlišče R_j, razen iz vozlišča R_i.

L_{ij} vpliva na verjetnost uspešnega prenosa določene brezžične povezave med parom vozlišč R_i in R_j v smeri iz R_i na R_j. Takšna interpretacija vpliva je smiselna, saj imajo največji vpliv na prenos paketa iz oddajnega vozlišča R_i na sprejemno vozlišče R_j tisti paketi, ki so poslani iz sosedov sprejemnika. Ti paketi povzročajo trke z opazovanim paketom in igrajo največjo vlogo pri pravilnem sprejemu paketa na sprejemnem vozlišču. V enačbi (4.7) je lahko vpliv paketov iz vozlišč sosedov na verjetnost uspešnega prenosa reguliran s parametrom $\lambda \in [0,1]$. Če sprejemno vozlišče R_j prejema samo pakete iz oddajnega vozlišča R_i (in nobenih drugih paketov), je verjetnost uspešnega prenosa paketa $p_{t,ij}$ med paroma vozlišč R_i in R_j enaka ena.

Treba je tudi omeniti, da verjetnost uspešnega prenosa paketa P_{ij} brezžične povezave med vozliščema R_i in R_j ni enaka verjetnosti uspešnega prenosa paketa P_{ji} brezžične povezave med vozliščema R_j in R_i. Zato imajo povezave med vozliščema R_i in R_j ter med vozliščema R_j in R_i različne verjetnosti uspešnega prenosa paketa v obe smeri, saj upoštevamo asimetričnost brezžičnih povezav.

Če povzamemo, je vrednost P_{ij} nekje med vrednostma $P_{ij,min}$ in $P_{ij,max}$, ki sta določeni na podlagi meritev o delovanju povezav v omrežju Roofnet in naših potreb, kjer zahtevamo, da imamo v omrežju verjetnosti uspešnega prenosa znotraj določenih mej, primernih za raziskovanje omrežnega kodiranja. Omrežno kodiranje zahteva, da imamo v omrežju povezave z visokimi verjetnostmi uspešnega prenosa za uspešno delovanje omrežnega kodiranja (Chi, Jianf, & Horiguchi, 2008).

4.3.2.2.3 3. faza: Odločanje o uspešnosti prenosa Na podlagi izračunane medvozliščne verjetnosti uspešnega prenosa paketa P_{ij} se paketi uspešno prenesejo na sprejemno vozlišče ali zavržejo na povezavi. Za določanje, kateri paketi se prenesejo in kateri se zavržejo, se uporabi tako imenovani proces naključja.

Takšen pristop določanja uspešnosti prenosa paketa doda modelu lastnost stohastičnega obnašanja, ki je prisotno v omrežju. To vnaša v model dodatno stopnjo dinamičnosti in s tem omogoča dodatno dinamičnost v omrežnem simulatorju.

Proces naključja, ki določa, ali je paket uspešno sprejet ali ne, temelji na podlagi kumulativne porazdelitvene funkcije (CDF), $F_X(x) = P(X \leq x)$, kjer je x določen z izračunano P_{ij}, X pa je naključna vrednost iz enakomerne porazdelitve $X \in [0,1]$. Če je X manjši ali enak P_{ij}, je paket uspešno prenešen. Nasprotno pa je paket izgubljen, če je X večji od P_{ij}.

4.3.2.2.4 4. faza: Zakasnitev razširjanja Zakasnitev razširjanja $T_{P,ij}$ predstavlja čas, ki je potreben za razširjanje signala preko brezžičnega medija iz oddajnega vozlišča i do sprejemnega vozlišča j. Izračunan je s pomočjo enačbe (4.9):

$$T_{P,ij} = d_{ij}/c_0 \tag{4.9}$$

kjer je d_{ij} razdalja med parom oddajnik/sprejemnik in c_0 je hitrost svetlobe.

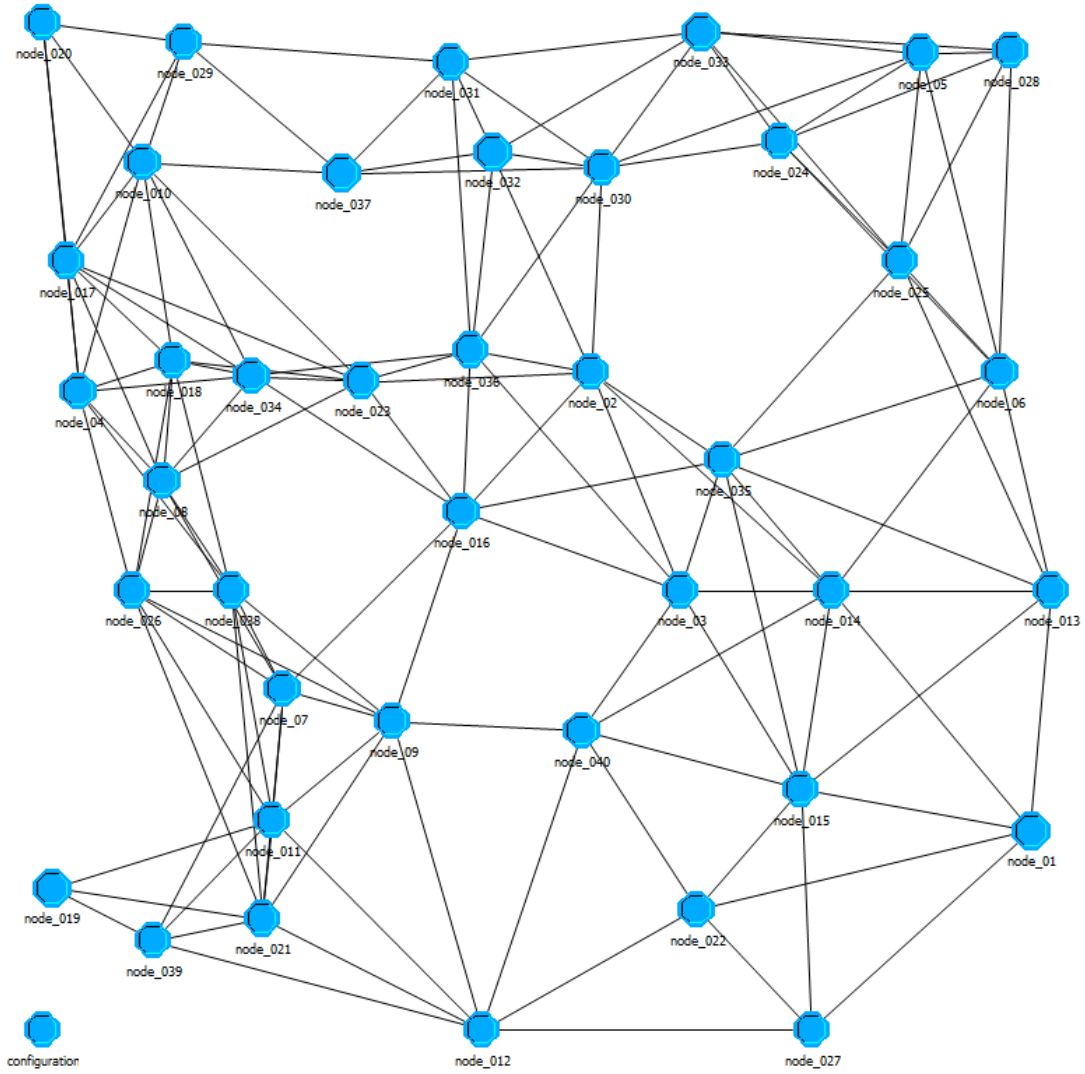
4.4 Nivoji simulacijskega modela

V tem poglavju so prikazani nivoji brezžičnega zankastega omrežja, ki smo jih realizirali v programskem okolju OPNET. Model je razdeljen na tri hierarhične nivoje: nivo omrežja, nivo vozlišča in nivo funkcionalnih modulov.

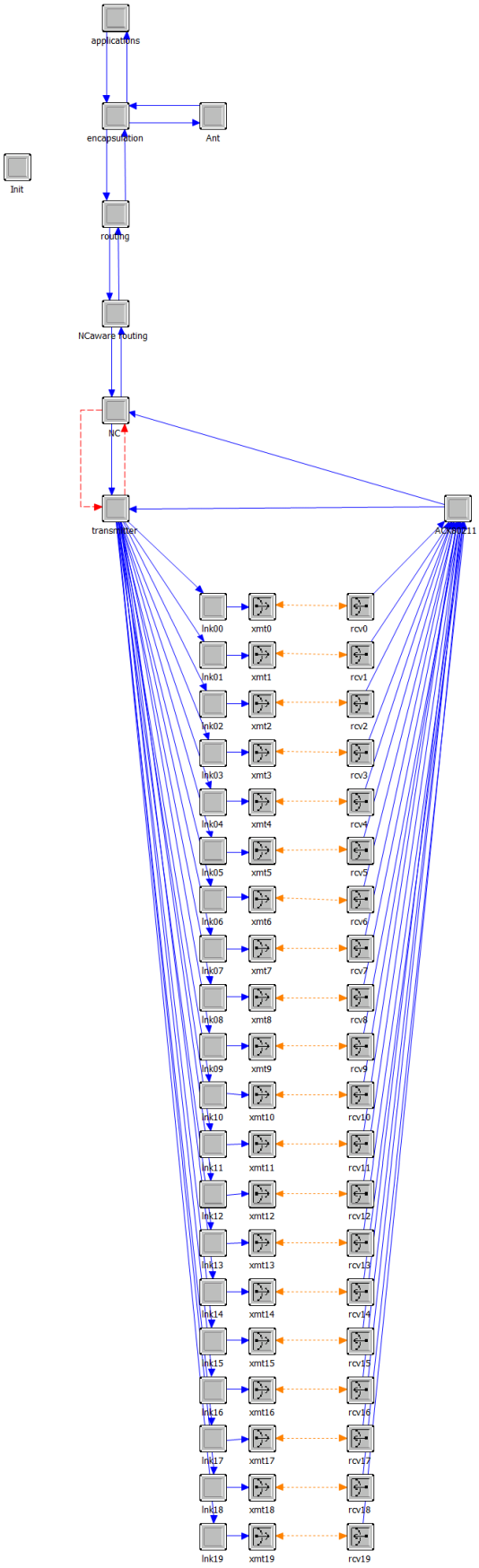
Najvišji nivo je nivo omrežja, kjer je definirana topologija brezžičnega zankastega omrežja s pomočjo modelov posameznih brezžičnih vozlišč kot gradnikov. Primer nivoja omrežja je prikazan na sliki 4.6 za topologijo T_1 iz poglavja 5.2.2. Na tem hierarhičnem nivoju se nahaja tudi modul za inicializacijo simulacijskega modela, sinhrono posodabljanje usmerjevalnih tabel in zbiranje podatkov za ovrednotenje predlaganega usmerjevalnega postopka CANCAR.

Drugi hierarhični nivo predstavlja model komunikacijskih funkcij posameznega brezžičnega vozlišča, ki sestoji iz več modulov in ga prikazuje slika 4.7.

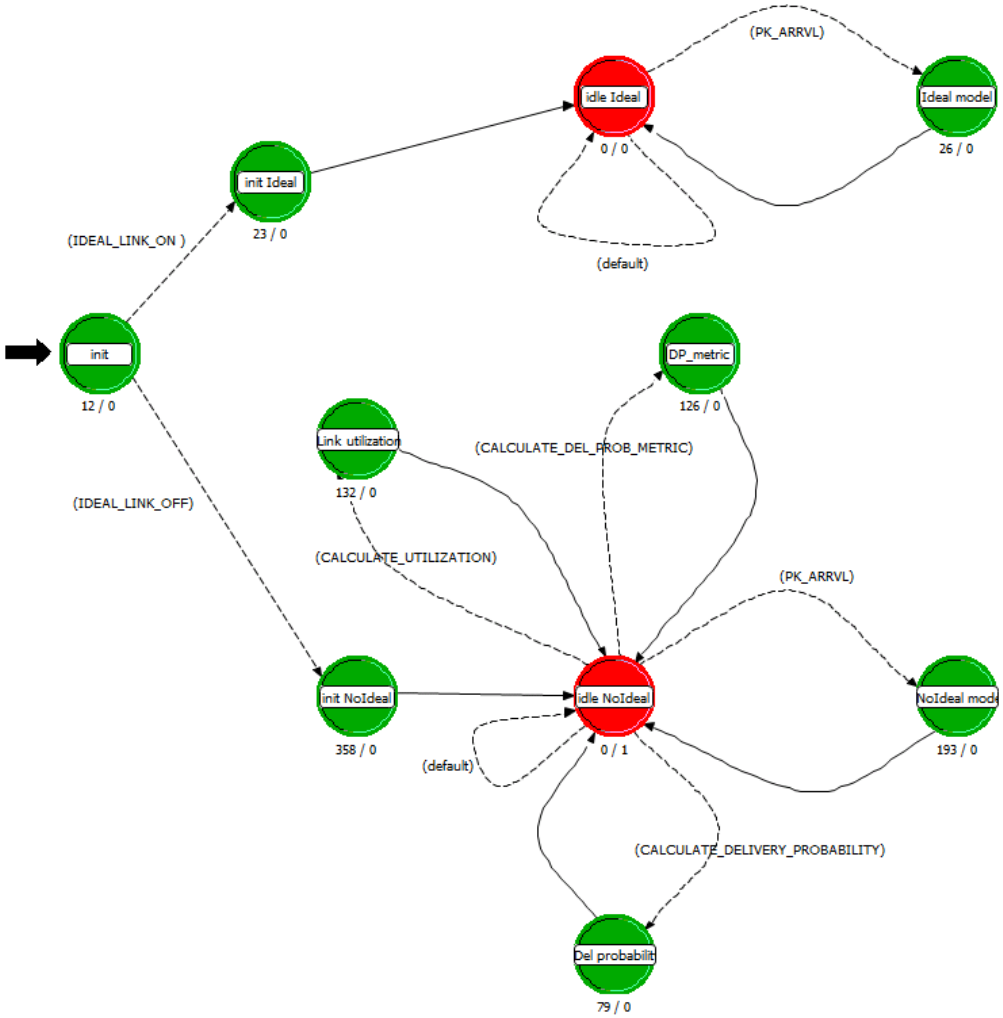
Posamezni moduli so na tretjem hierarhičnem nivoju predstavljeni v obliki končnega avtomata stanj. Kot primer prikazujemo na sliki 4.8 modul za brezžično povezavo, ki je bil predstavljen v poglavju 4.3. Posamezne funkcije in prehodi iz enega stanja v drugo so napisani v programskem jeziku C.



Slika 4.6: Model brezžičnega zankastega omrežja.



Slika 4.7: Modul komunikacijskih funkcij posameznega brezžičnega vozlišča.



Slika 4.8: Modul brezžičnih povezav.

Poglavje 5

Ovrednotenje delovanja usmerjevalnega postopka CANCAR

Za ovrednotenje delovanja predlaganega usmerjevalnega postopka CANCAR smo izvedli izčrpno analizo s pomočjo simulacij v omrežno kodirnem simulacijskem modelu za brezžična zankasta omrežja, predstavljenem v poglavju 4. Ovrednotenje smo izvedli za različne porazdelitve intenzivnosti prometnih tokov in različne omrežne topologije.

Za ovrednotenje delovanja postopka CANCAR smo v simulacijah uporabili tri tipe postopkov za omrežja. Uporabljene postopke smo označili z naslednjimi poimenovanji:

1. CANCAR – uporabili smo predlagano usmerjanje za preprečevanje zasičenja z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja v kombinaciji z omrežno kodirnim postopkom COPE in tradicionalnim usmerjanjem na osnovi metrike ETX.
2. COPE – uporabili smo omrežno kodirni postopek COPE v kombinaciji s tradicionalnim usmerjanjem na osnovi metrike ETX.
3. ETX – uporabili smo tradicionalno usmerjanje na osnovi metrike ETX brez omrežno kodirnega postopka.

V vseh treh primerih smo za tradicionalno usmerjanje uporabili Dijkstrov usmerjevalni algoritem za iskanje najkrajših poti. Prav tako smo v vseh treh primerih kot metriko za usmerjevalni algoritem uporabili metriko ETX.

Splošni cilj simulacij je bil kvantizacija koristi uporabe predlaganega usmerjevalnega postopka CANCAR za usmerjanje z zavedanjem uporabe omrežnega kodiranja v primerjavi s tradicionalnim usmerjanjem, ki ne upošteva uporabe omrežnega kodiranja v omrežju, ki je bilo uporabljeno tudi v (Katti, Rahul, Hu, Katabi, Médard, & Crowcroft, 2008).

5.1 Parametri simulacij

Pri naših analizah smo uvedli določene predpostavke za lažjo izvedbo analiz ter lažje sledenje vplivom usmerjanja in rezultatom v simulacijah. Predpostavili smo, da imamo homogena brezžična omrežja, kjer imajo vsa vozlišča enako konfiguracijo. Predpostavljamo tudi statičnost vozlišč. Vozlišča so predhodno postavljena na podlagi določitve topologije omrežja in se ne premikajo, zato so njihove lokacije vnaprej znane. Vsa povezana vozlišča v omrežju imajo kapaciteto kanala enako 2 Mbit/s. Verjetnost uspešnega prenosa paketov na brezžičnih povezavah se spreminja dinamično s pomočjo predlaganega modela uspešnosti paketnega prenosa preko brezžičnih povezav. Odvisna je od razdalje med vozlišči in upošteva vpliv izgub na poti v brezžičnem okolju. Odvisna je tudi od količine prometa med sosednjimi vozlišči, s čimer upoštevamo izgube na povezavah zaradi medsebojne interference. Med simulacijo se verjetnost uspešnega prenosa paketov na povezavah spreminja med 100 % in 90 %. Pri verjetnostih uspešnega prenosa paketov predpostavljamo visoke vrednosti zaradi uporabe omrežno kodirnega postopka COPE, ki potrebuje za uspešno delovanje dobre pogoje na povezavah v omrežju (Chi, Jianf, & Horiguchi, 2008), kar pomeni majhne izgube na povezavah. S tem predpostavljamo, da obstajajo dobre (kvalitetne) povezave v omrežju, ki se uporabijo za usmerjanje prometa.

V simulacijah smo generirali UDP promet. Pakete smo generirali na izbranih izvornih vozliščih z enako intenziteto. Uporabljali smo eksponentno porazdelitev med časi

generiranja paketov. Pakete smo poslali izbranim ponornim vozliščem. Količino generiranih paketov znotraj posameznega prometnega toka smo povečevali preko posameznih simulacijskih ciklov. S tem smo simulirali različne celotne prometne obremenitve v omrežju. Predpostavili smo, da so vsi paketi velikosti 10 kbitov.

Vsak simulacijski cikel je trajal 960 sekund. Prvih 60 sekund je bila prometna obremenitev nastavljena na 80 % končne obremenitve, da je sistem v simulaciji prišel v stacionarno stanje. Nato se je omrežje obremenilo s polno prometno obremenitvijo. Rezultati so se zbirali 900 sekund. Za vsak simulacijski scenarij smo simulacijo ponovili osemkrat, vsakič z drugačno začetno nastavitvijo generatorja različnih števil. Prikazani rezultati so torej povprečje rezultatov, ki smo jih pridobili iz osmih različnih simulacijskih tekov.

Usmerjevalne poti so se izračunale na začetku vsakega simulacijskega cikla in so se posodobile vsakih 30 sekund s pomočjo uporabljenega usmerjevalnega postopka. Časovni interval, v katerem se je zajela potrebna informacija za usmerjanje, je bil enak intervalu posodobitve usmerjevalnih poti za vse tri tipe postopkov CANCAR, COPE in ETX.

Za ovrednotenje delovanja predlaganega postopka CANCAR smo definirali tudi izmerjen kodirni dobitek G_x vozlišča V_x. Ta je enak razmerju med številom izvornih paketov S_x, usmerjanih s strani vozlišča brez uporabe kodiranja, in številom paketov R_x, potrebnih za oddajo izvornih paketov s kodiranjem, kot prikazuje enačba (5.1):

$$G_x = \frac{S_x}{R_x} \tag{5.1}$$

Tabela 5.1 povzema parametre, ki smo jih uporabili za postopek CANCAR v predstavljeni analizi.

Za parameter P_Q smo nastavili pragovno vrednost na 1. S tem smo preprečili izvajanje postopka CANCAR v primeru majhne prometne obremenitve v omrežju. Ta parameter določa pragovno vrednost za povprečno število paketov v čakalni vrsti vozlišča, pri kateri se smatra, da je vozlišče pod visoko prometno obremenitvijo. Parameter se lahko optimira za znano omrežno topologijo in porazdelitev prometnih tokov z namenom, da se izognemo zaganjanju algoritma za določanje alternativnih poti, dokler je omrežje sposobno usmerjati promet brez postopka CANCAR. Z upoštevanjem dejstva, da so koristi uporabe postopka CANCAR v primerjavi s postopkom COPE večje pri velikih prometnih obremenitvah, kjer se začnejo vozlišča v ozkih grlih omrežja z uporabo postopka COPE zasičevati zaradi velikega prometa, se je nastavljena vrednost za parameter P_Q izkazala kot primerna za naključna omrežja in prometne razporeditve. Vrednost parametra H, to je maksimalno dovoljeno povečanje števila skokov na alternativni poti v primerjavi z najkrajšo potjo, je bila nastavljena na 2. Prag podobne obremenjenosti vozlišč Z, ki se ga uporablja za določanje, ali je vozlišče na alternativni poti podobno obremenjeno kot najbolj obremenjeno vozlišče V_C, je bil nastavljen na 0.1. Vrednosti sta se eksperimentalno izkazali kot najbolj primerni vrednosti za obravnavane topologije. Omogočata pojav dovoljšnjega števila prometno manj obremenjenih alternativnih poti, potrebnih za preusmeritev prometnih tokov, ki niso bistveno daljše od najkrajših poti. Parameter Q_V, to je dolžina čakalne vrste vozlišč, je bil nastavljen na 100 na podlagi izkušenj iz drugih del na področju omrežnega kodiranja. Omogočil je razumljiv čas, potreben za simulacije, ki se povečuje z večanjem parametra Q_V. Določitev parametra U je predstavljena v poglavju 3.3.7.

Tabela 5.1: Vrednosti parametrov za postopek CANCAR.

Parameter	Vrednost
Q_V	100
P_Q	1
Z	0,1
H	2
U	2

5.2 Analiza rezultatov simulacij

5.2.1 Rezultati za referenčna scenarija

Najprej smo preučili uspešnost delovanja postopka CANCAR v dveh referenčnih scenarijih za omrežno topologijo, prikazano na slikah 3.1, 3.2, 3.3 in 3.4 v poglavju 3.1. Omrežno topologijo sestavlja 23 brezžičnih vozlišč, postavljenih v območju kvadrata s stranico 1,2 km. Premer omrežja je 6, povprečno število skokov na poti v omrežju je 3,05 in povprečno število brezžičnih povezav na vozlišče je 2,61. Prometni tokovi v omrežju so bili generirani, kot je opisano v poglavju 3.1 in prikazano na slikah 3.1, 3.2, 3.3 in 3.4.

5.2.1.1 Koristni omrežni pretok

Na slikah 5.1 in 5.2 je prikazan pretok prometa v omrežju ali koristni omrežni pretok v odvisnosti od prometne obremenitve v omrežju za oba enostavna scenarija I in II, ki sta bila analizirana v poglavju 3.1. Pretok prometa je prikazan za postopke CANCAR, COPE in ETX.

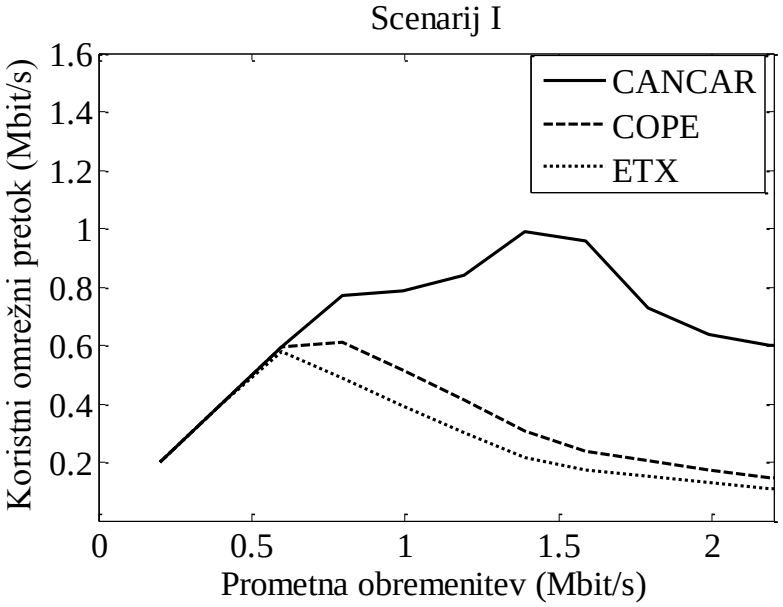
V scenariju I imamo štiri prometne tokove med pari vozlišč 13-17, 17-13, 6-8 in 9-7. V scenariju II pa smo dodali tem štirim prometnim tokovom še dva dodatna prometna tokova med paroma vozlišč 20-18 in 19-21.

Koristni omrežni pretok prometa, ki ga opazujemo v tem poglavju, je promet, namenjen aplikacijskemu sloju. Ostali promet, generiran na drugih slojih sistema OSI, je tukaj izvzet, saj je potreben le za delovanje omrežja, ni pa koristen za uporabnika. Koristni omrežni pretok predstavlja torej količino koristnih podatkov, dostavljenih preko omrežja na časovno enoto. Na grafih prikažemo rezultate do prometnih obremenitev, ko uspe omrežni pretok naraščati pri uporabi postopka CANCAR.

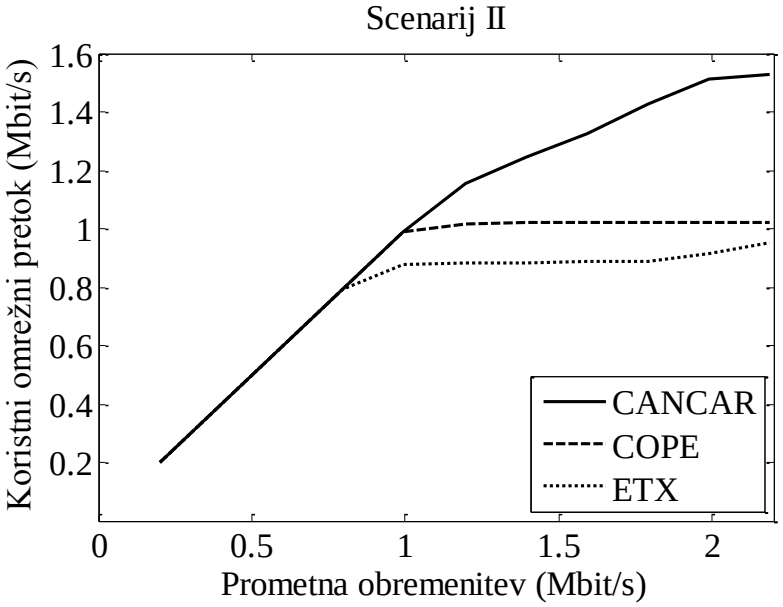
V primeru majhnih prometnih obremenitev delujejo postopki CANCAR, COPE in ETX podobno, saj je v omrežju malo oziroma nič priložnosti za kodiranje med prometnimi tokovi. Ko se prometna obremenitev poveča, uspe postopek COPE zaradi uporabe omrežnega kodiranja dostaviti več prometa kot postopek ETX, zato je koristni omrežni pretok za postopek COPE večji od postopka ETX. To se zgodi predvsem zato, ker se s pomočjo uporabe postopka COPE paketi kodirajo v ozkem grlu omrežja (to je vozlišče 1), ki tako omogoči, da se posreduje več paketov skozi vozlišče 1 pri večjih prometnih obremenitvah. Največji koristni omrežni pretok uspe zagotoviti postopku CANCAR, ki prenese prometne obremenitve, pri katerih se omrežje zasiči tudi pri uporabi omrežno kodirnega postopka COPE.

Postopek CANCAR zazna, da vozlišče 1 od neke točke naprej ne uspe posredovati povečanega prometa, čeprav uporablja omrežno kodiranje v omrežju. To povzroči, da se paketi izvržejo iz čakalne vrste vozlišča 1. Zato postopek preusmeri nekodirana prometna tokova med paroma vozlišč 6-8 in 9-7 na alternativni poti 6→18→22→20→10→8 in 9→11→21→23→19→7, proč od vozlišča 1. S tem sprosti nekaj virov na vozlišču 1, ki jih lahko uporabi za prenos paketov prometnih tokov med paroma vozlišč 13-17 in 17-13. Slednji paketi bi se v primeru posredovanja nekodiranega prometa preko vozlišča 1 izvrgli zaradi omejenih čakalnih vrst vozlišč, sedaj pa lahko gredo skozi vozlišče 1. Ker prometna tokova potujeta v nasprotni smeri, se bodo njuni paketi z veliko verjetnostjo kodirali. Postopek CANCAR torej ustvari več priložnosti za kodiranje za ta dva prometna tokova na vozlišču 1. V scenariju II se preusmerjena prometna tokova 6-8 in 9-7 uspeta kodirati na alternativnih poteh s prometnima tokovoma 20-18 in 19-21 na vozliščih 22 in 23, kot je prikazano na sliki 3.4 v poglavju 3.1, s čimer se privarčuje na pasovni širini v teh delih omrežja.

V scenariju I se z uporabo postopkov ETX in COPE koristni omrežni pretok povečuje s prometno obremenitvijo le do približno 0,6 Mbit/s oziroma 0,8 Mbit/s. Takrat postane omrežje zasičeno in vsako povečanje obremenitve omrežja le zmanjšuje skupni koristni omrežni pretok v omrežju. V tem območju zagotavlja postopek CANCAR glavno izboljšanje delovanja omrežja z vidika koristnega omrežnega pretoka in zmore prenesti prometne obremenitve vse do približno 1,6 Mbitov/s. Postopek CANCAR uspe zaznati tisti del omrežja, ki se približuje stanju zasičenja (to je vozlišče 1) in preusmeri nekodirane prometne tokove mimo preobremenjenega območja, s čimer omogoči kodiranje večjega števila paketov v kodiranih prometnih tokovih.



Slika 5.1: Koristni omrežni pretok v odvisnosti od prometne obremenitve za scenarij I.



Slika 5.2: Koristni mrežni pretok v odvisnosti od prometne obremenitve za scenarij II.

5.2.1.2 Kodirni dobitek vozlišča

Kodirni dobitki vozlišč so predstavljeni na slikah 5.3 in 5.4 za scenarija I in II, ko uporabimo postopka COPE (a) in CANCAR (b). Predstavljeni kodirni dobitki vozlišč so predstavljeni za primer, ko je prometna obremenitev v omrežju 1,4 Mbit/s za scenarij I in 1,8 Mbit/s za scenarij II. Enake ugotovitve veljajo za ostale podobne prometne obremenitve, pri katerih deluje postopek CANCAR bolje od postopka COPE na slikah 5.1 in 5.2.

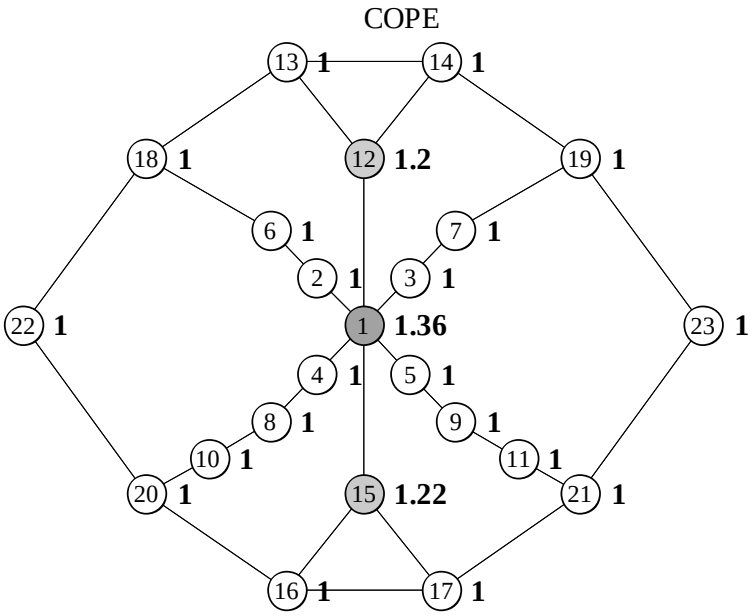
Z uporabo postopka CANCAR pride do kodiranja na vozliščih 1, 12 in 15 v scenariju I. V scenariju II pa pride do kodiranja tudi na vozliščih 22 in 23. Tukaj je potrebno poudariti,

da imamo prometne tokove (in zato več paketov znotraj vsakega toka), medtem ko smo v poglavju 3.1 le teoretično analizirali nekaj posameznih paketov; en paket za en prometni tok. Zato pride v poglavju 3.1 do kodiranja le na vozlišču 1 v scenariju 1 ter na vozliščih 1, 22 in 23 v scenariju II, medtem ko se v praksi pojavi priložnost za kodiranje tudi na vozliščih 12 in 15.

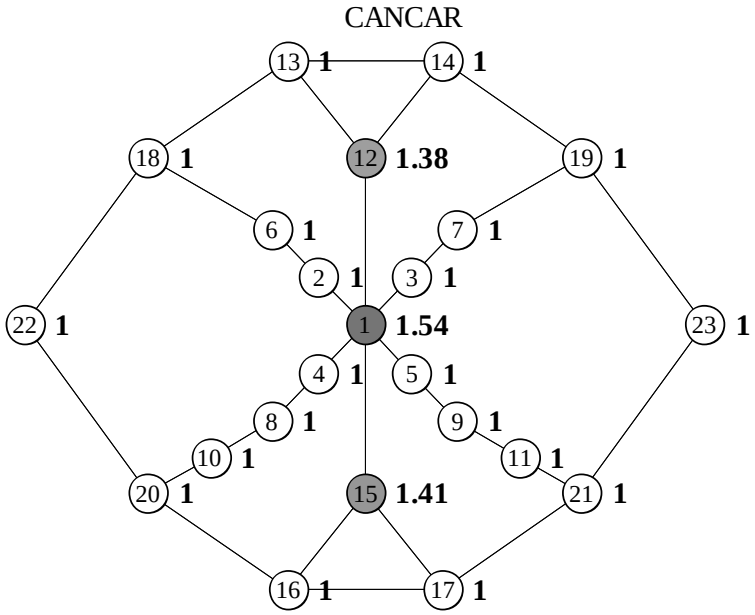
Iz slik 5.3 in 5.4 lahko ugotovimo, da so kodirni dobitki vozlišč večji v primeru uporabe postopka CANCAR. To se zgodi zaradi dejstva, da uspe postopek CANCAR preusmeriti prometna tokova med paroma vozlišč 6-8 in 9-7, ki se ne kodirata na vozlišču 1, in s tem omogoči prometnima tokovoma 13-17 in 17-13 še boljše kodiranje na vozliščih 1, 12 in 15. Zato pride do kodiranja večjega števila paketov (za varčevanje s pasovno širino) in manj izvrženih paketov iz čakalnih vrst na teh vozliščih, s čimer omogočimo večjo prepustnost prometa v omrežju.

Poleg tega vozlišči 22 in 23 ne kodirata nobenega paketa v primeru uporabe postopka COPE v scenariju II. Z uporabo postopka CANCAR pa je obema vozliščema omogočeno kodiranje, kar doprinese k varčevanju s pasovno širino v teh delih omrežja. Ko se prometna tokova med paroma vozlišč 6-8 in 9-7 preusmerita, se lahko kodirata s prometnima tokovoma 20-18 in 19-21 na vozliščih 22 in 23, kjer pride do novih priložnosti za kodiranje v omrežju.

Kodirni dobitki vozlišč so pri uporabi istega postopka različni za scenarij I in scenarij II. Na kodirne dobitke vozlišč vplivajo številni faktorji, kot so prometna obremenitev, prometna razporeditev, topologija omrežja, velikost intervala posodobitve usmerjevalnih tabel itd. Večja prometna obremenitev načeloma omogoči večje kodirne dobitke vozlišč. Razporeditev prometa in topologija omrežja pa določata, kako si vozlišča delijo skupni brezžični medij, preko katerega komunicirajo s sosednjimi vozlišči, kar spet vpliva na število kodirnih priložnosti. Velikost intervala posodobitve usmerjevalnih tabel določa frekvenco posodabljanja usmerjevalnih poti, ki prav tako vpliva na razporeditev in število kodirnih priložnosti v omrežju.

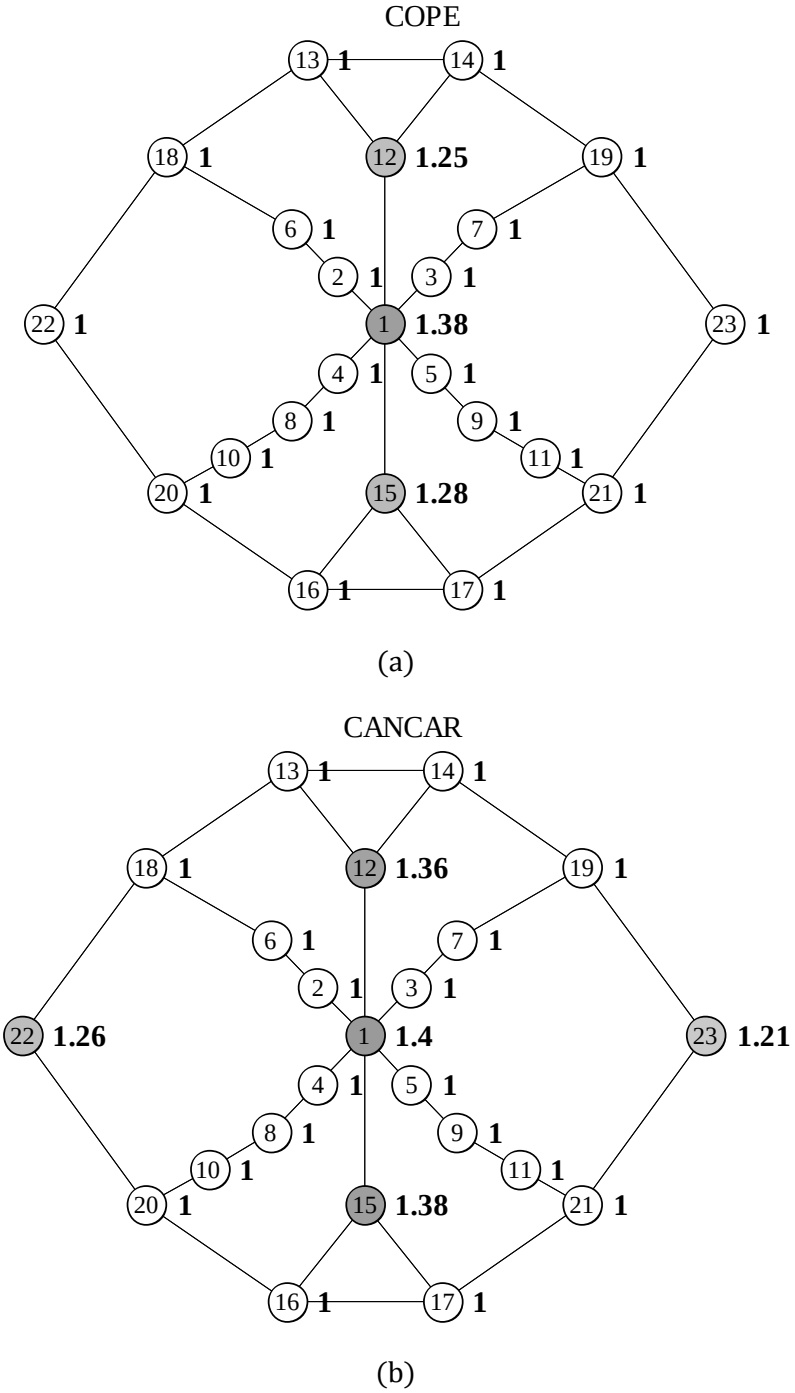


(a)



(b)

Slika 5.3: Izmerjeni kodirni dobitki vozlišč za scenarij I: (a) uporabljen postopek COPE, (b) uporabljen postopek CANCAR.



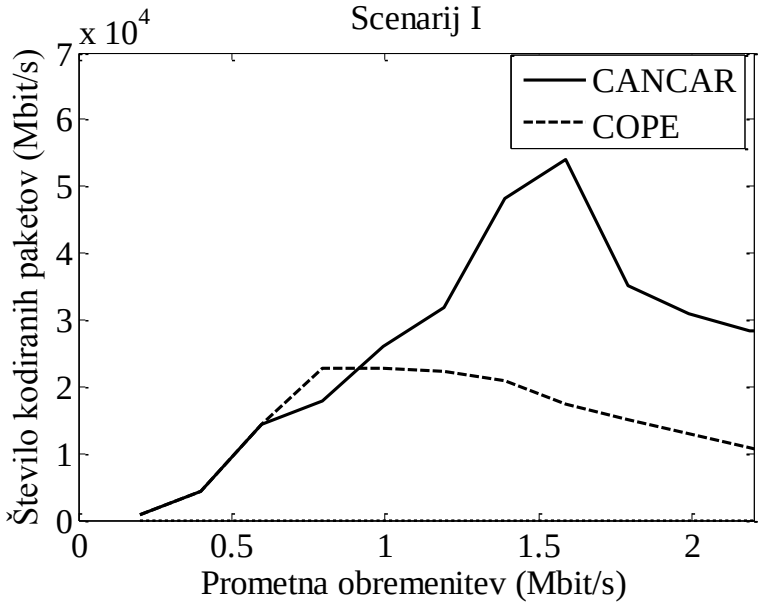
Slika 5.4: Izmerjeni kodirni dobitki vozlišč za scenarij II: (a) uporabljen postopek COPE, (b) uporabljen postopek CANCAR.

5.2.1.3 Število kodiranih paketov

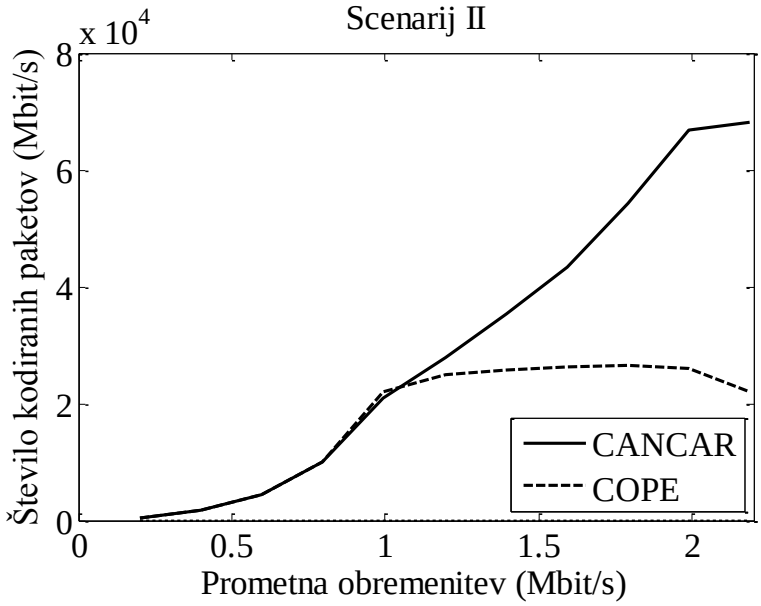
Na koncu smo preverili še število kodiranih paketov v odvisnosti od prometne obremenitve v omrežju za oba postopka CANCAR in COPE. Rezultate prikazujeta sliki 5.5 in 5.6. Iz slik je razvidno, da se kodira več paketov s pomočjo postopka CANCAR v primerih, ko so koristi uporabe postopka CANCAR večje od koristi uporabe postopka COPE na slikah 5.1 in 5.2. Kodirni dobitek v ozkem grlu omrežja je po preusmeritvi nekodirajočih se prometnih tokov in novih priložnostih za kodiranje za nekodirane

prometne tokove na novih usmerjevalnih poteh (v primeru scenarija II) večji pri uporabi postopka CANCAR. To omogoča boljše delovanje omrežja v smislu koristnega omrežnega pretoka, predstavljenega na slikah 5.1 in 5.2.

Vidimo lahko tudi, da pri določenih prometnih obremenitvah pod 1 Mbit/s postopek COPE kodira več paketov kot postopek CANCAR. To je predvsem opazno v scenariju I in je posledica preusmeritve nekodiranih prometnih tokov s postopkom CANCAR za preprečitev pojava zasičenja na vozlišču 1. Preusmeritev prometnih tokov zmanjša prometno obremenitev na vozliščih, kjer se je prej pojavljalo kodiranje, pod prometni nivo, potreben za ustvarjanje priložnosti za kodiranje na vozliščih. S povečevanjem prometne obremenitve se promet na teh vozliščih ponovno poveča in postopek CANCAR uspe kodirati več paketov kot postopek COPE.



Slika 5.5: Število kodiranih paketov v odvisnosti od prometne obremenitve za scenarij I.



Slika 5.6: Število kodiranih paketov v odvisnosti od prometne obremenitve za scenarij II.

5.2.1.4 Ocena režijskih stroškov

Režijski stroški usmerjanja s pomočjo usmerjevalnega postopka CANCAR v primerjavi z režijskimi stroški tradicionalnega usmerjanja z metriko ETX so primerljivi. Povečanje števila izvornih paketov za usmerjanje s postopkom CANCAR je zanemarljivo.

Najbolj obremenjeno vozlišče mora preusmeriti le 2 prometna tokova, kar je majhna številka. Za preusmeritev teh dveh tokov potrebuje postopek CANCAR poslati le 2 dodatna izvorna paketa (za kratki poročili) do pripadajočih ponorov (vozlišč 13 in 17), kar povzroči le 0,4-odstotno povečanje števila izvornih paketov za informacijo o usmerjanju v primeru uporabe postopka CANCAR v primerjavi z usmerjanjem na podlagi metrike ETX; odstotek povečanja režijskih stroškov za postopek CANCAR pa je še veliko manjši od te številke, kar je predstavljeno v poglavju 3.4.

Podobno velja za povečanje števila bitov v sporočilu za informacijo o usmerjanju, kjer se vsakemu sporočilu za informacijo o usmerjanju doda 8 bitov.

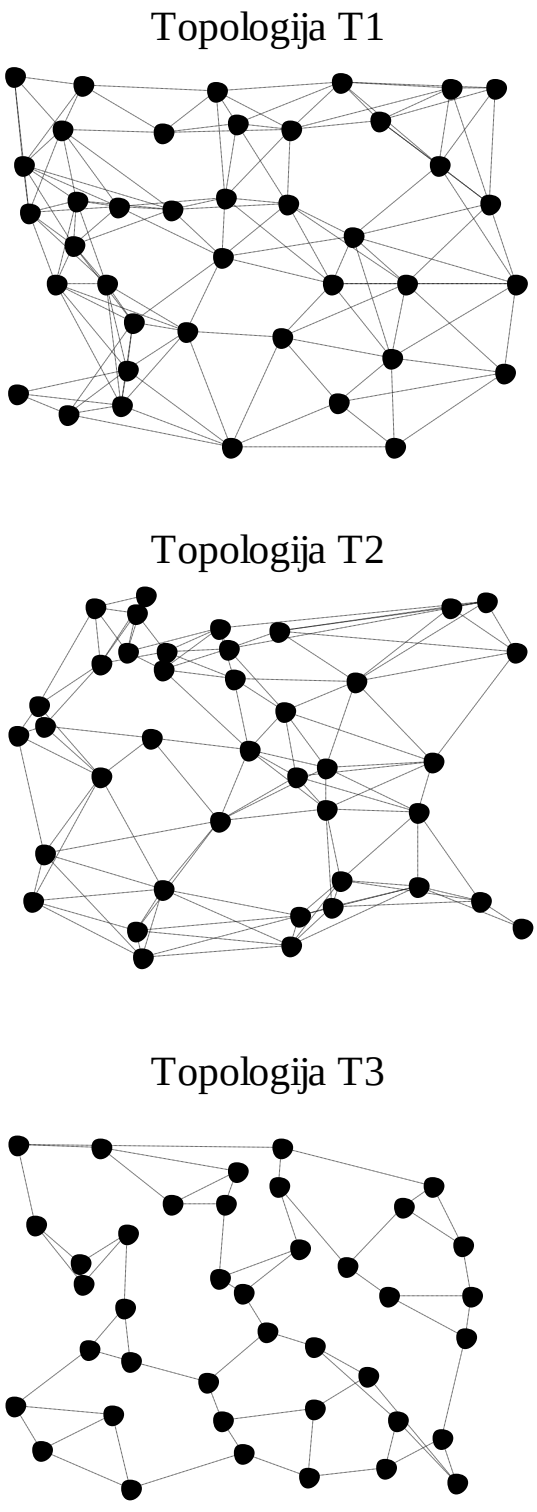
5.2.1.5 Zaključki na podlagi referenčnih scenarijev

Skupni simulacijski rezultati za oba referenčna scenarija potrjujejo splošno obnašanje predlaganega postopka CANCAR, razloženega v poglavju 3.1. Prometni tokovi, ki gredo skozi ozko grlo omrežja in se ne kodirajo, preprečujejo ostalim kodiranim prometnim tokovom na najbolj obremenjenem vozlišču, da bi se kodirali bolj pogosto. To ima za posledico nižje kodirne dobitke na najbolj obremenjenem vozlišču, zlasti ko je ozko grlo pod veliko večjimi prometnimi obremenitvami kot ostali deli omrežja. Če za nekodirane prometne tokove obstajajo alternativne poti, je potrebno v primeru velikih prometnih obremenitev te prometne tokove preusmeriti iz ozkega grla omrežja. S preusmeritvijo nekodiranih prometnih tokov na alternativne poti se zmanjša gostota prometa in medsebojna interferenca. To omogoča večje kodirne dobitke za kodirane prometne tokove na najbolj obremenjenem vozlišču in posledično večjo prepustnost prometa v in okoli ozkega grla. V primeru priložnosti za kodiranje na alternativnih poteh pa se prej nekodirani tokovi lahko kodirajo z obstoječimi prometnimi tokovi na teh poteh.

Na podlagi teh zaključkov smo potrdili izboljšano delovanje omrežij z uporabo usmerjevalnega postopka CANCAR v primerjavi s postopkom COPE (brez uporabe usmerjanja za omrežno kodiranje) in ETX (brez uporabe omrežnega kodiranja).

5.2.2 Rezultati za brezžična zankasta omrežja

V tem poglavju potrdimo splošno delovanje predlaganega koncepta, vgrajenega v usmerjevalni postopek CANCAR, tako da pokažemo, da je postopek primeren za uporabo v splošnih brezžičnih zankastih omrežjih in ne samo za teoretične študije, kjer imamo nadzorovano topologijo in vnaprej poznane usmerjevalne poti za prometne tokove v omrežju. V ta namen smo raziskali njegovo delovanje v treh sintetično generiranih naključnih omrežnih topologijah. Raziskane omrežne topologije so sestavljene iz 40 brezžičnih naključno postavljenih vozlišč znotraj kvadratnega območja s stranico 1 km. Predstavljene omrežne topologije so prikazane na sliki 5.7 in označene kot T1, T2 in T3. Domet prenosa za vozlišča je predpostavljen na 350 m v T_1 ter 500 m v T_2 in T_3. V T_1 in T_2 je dovoljeno število povezav posameznega vozlišča 8, v T_3 pa 3. V topologiji T_3 smo zmanjšali dovoljeno število povezav vozlišča na 3. S tem smo zmanjšali število potencialnih alternativnih poti, kar se zgodi tudi v realnih omrežjih, ko so v omrežju prisotne različne fizične ovire med bližnjimi vozlišči. Karakteristike omrežnih topologij so povzete v tabeli 5.2.



Slika 5.7: Sintetično generirane naključne topologije brezžičnih zankastih omrežij.

Nadalje smo predpostavili, da brezžična zankasta omrežja predstavljajo pritočni segment WiFi omrežja, ki deluje kot prenosno omrežje za prenos prometa iz enega dela v drugi del omrežja. Tako smo izbrali dve skupini po 10 vozlišč. Ena skupina vozlišč je predstavljala omrežne prehode (angl. network gateway) za zagotavljanje povezanosti omrežja z drugimi zunanjimi omrežji, medtem ko je druga skupina vozlišč predstavljala

dostopovne točke za uporabnike. Promet iz omrežnih prehodov do uporabniških dostopovnih točk predstavlja promet proti uporabniku (DL). Uporabnik lahko tudi pošilja promet v omrežje za uporabnike v drugih omrežjih. Ta promet predstavlja promet od uporabnika (UP). Vozlišča v omrežju med tema dvema skupinama predstavljajo brezžično zankasto hrbtenico omrežja in se uporabljajo za prenos obeh tipov prometa med izbranima skupinama vozlišč.

Generirali smo 60 in 100 prometnih tokov med zgoraj definiranima skupinama vozlišč, kjer je bilo vsako vozlišče izbrano natanko trikrat kot izvor in ponor za prometni tok, kar pomeni izbor 30 (označeno kot F30) in 50 (označeno kot F50) kombinacij dvosmernih (UL/DL) prometnih tokov oziroma parov prometnih tokov med določenimi vozlišči. Za oba prometna vzorca smo generirali dve različni razmerji med prometoma UL in DL v vsaki kombinaciji dvosmernega prometnega toka: simetrično razmerje, označeno kot $R_1=(UL/DL)_1=1$, in razmerje, kjer je bil prevladujoč promet proti uporabniku, označeno kot $R_2=(UL/DL)_2=1/3$.

Tabela 5.2: Karakteristike raziskanih omrežnih topologij.

Topologija	Presek	Povprečno število skokov	Število povezav na vozlišče
T_1	6	2,73	6,85
T_2	7	2,94	5,95
T_3	9	4,61	3

5.2.2.1 Koristni omrežni pretok

Najprej predstavimo rezultate za koristni omrežni pretok v odvisnosti od prometne obremenitve v omrežju za postopke CANCAR, COPE in ETX na slikah 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 in 5.13. Rezultati so predstavljeni za vse tri topologije (T_1, T_2, T_3), dve različni števili generiranih prometnih tokov (F30=30 in F50=50 prometnih tokov) in dve različni razmerji med prometom proti uporabniku in prometom od uporabnika UL/DL ($R_1=1$ and $R_2=1/3$).

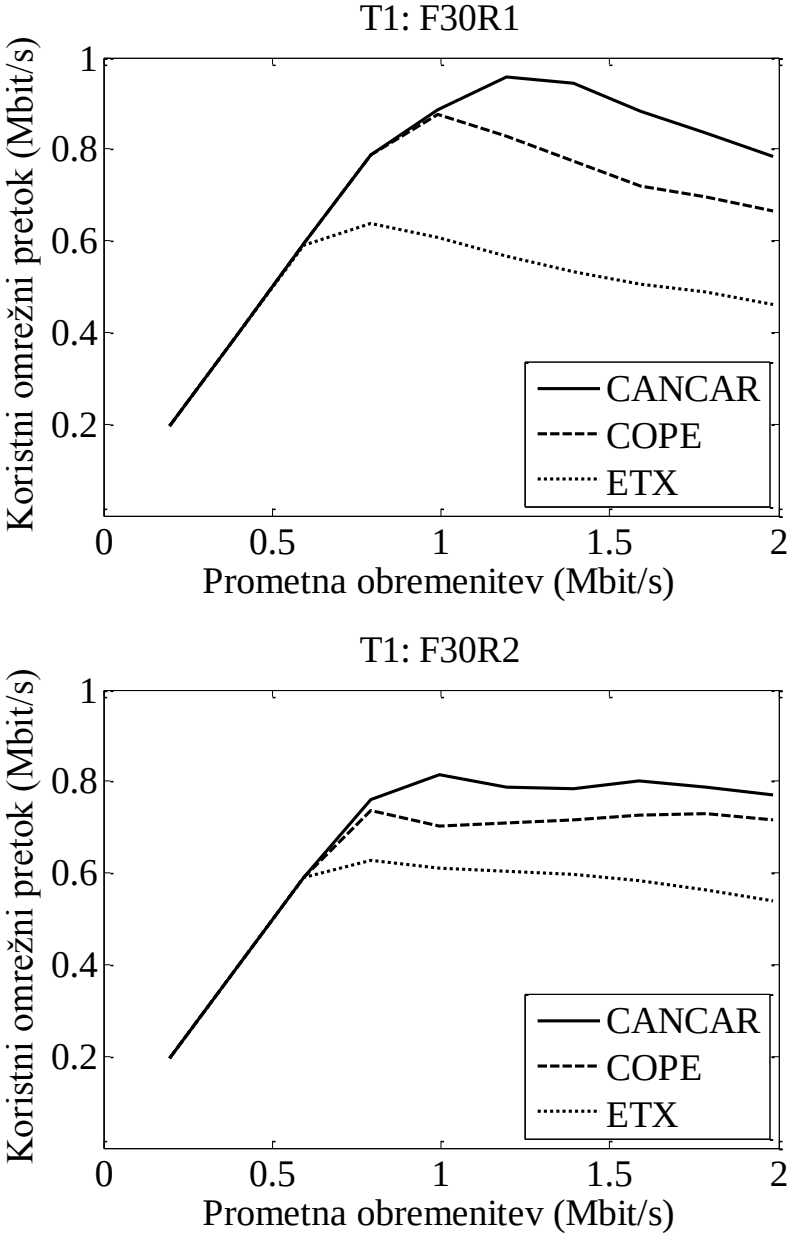
Rezultati potrjujejo, da z uporabo postopka COPE znatno povečamo koristni omrežni pretok v primerjavi s postopkom ETX, kjer nimamo omrežnega kodiranja. S postopkom CANCAR pa dosežemo dodatno izboljšanje koristnega omrežnega pretoka v primerjavi s postopkom COPE. Tako je postopek CANCAR sposoben upravljati z največjo prometno obremenitvijo, medtem ko je usmerjanje s pomočjo postopka ETX brez uporabe omrežnega kodiranja sposobno upravljati z najmanjšo prometno obremenitvijo v vseh predstavljenih scenarijih.

Za vse tri postopke smo preverili spreminjanje najbolj obremenjenega vozlišča v omrežju ob posameznih intervalih posodobitve usmerjevalnih tabel v simulaciji. S tem smo želeli oceniti pojav nihanj (angl. oscillations) v omrežju. Slednje se pojavljajo pri proaktivnem usmerjanju in lahko skupaj s ponovnim pošiljanjem izvrženih paketov iz čakalnih vrst v visoko obremenjenih omrežjih povečajo pomešanje paketov (angl. packet reordering) na poti do ponora. Za vse tri postopke ostane v večini primerov najbolj zasičeno vozlišče isto, kar nakazuje na to, da je intenziteta nihanj za vse tri postopke podobna in ni bistvena. Pri nizki obremenitvi omrežja pa je pri uporabi postopkov CANCAR in COPE pomešanje paketov povsem enako, saj ni zaznanega nobenega visoko obremenjenega vozlišča, zato se za usmerjanje prometa uporabijo najkrajše poti tudi v primeru uporabe postopka CANCAR. Za zmanjšanje pomešanja paketov je torej potrebno narediti kompromis med intenziteto nihanj ter količino izvrženih paketov iz čakalnih vrst.

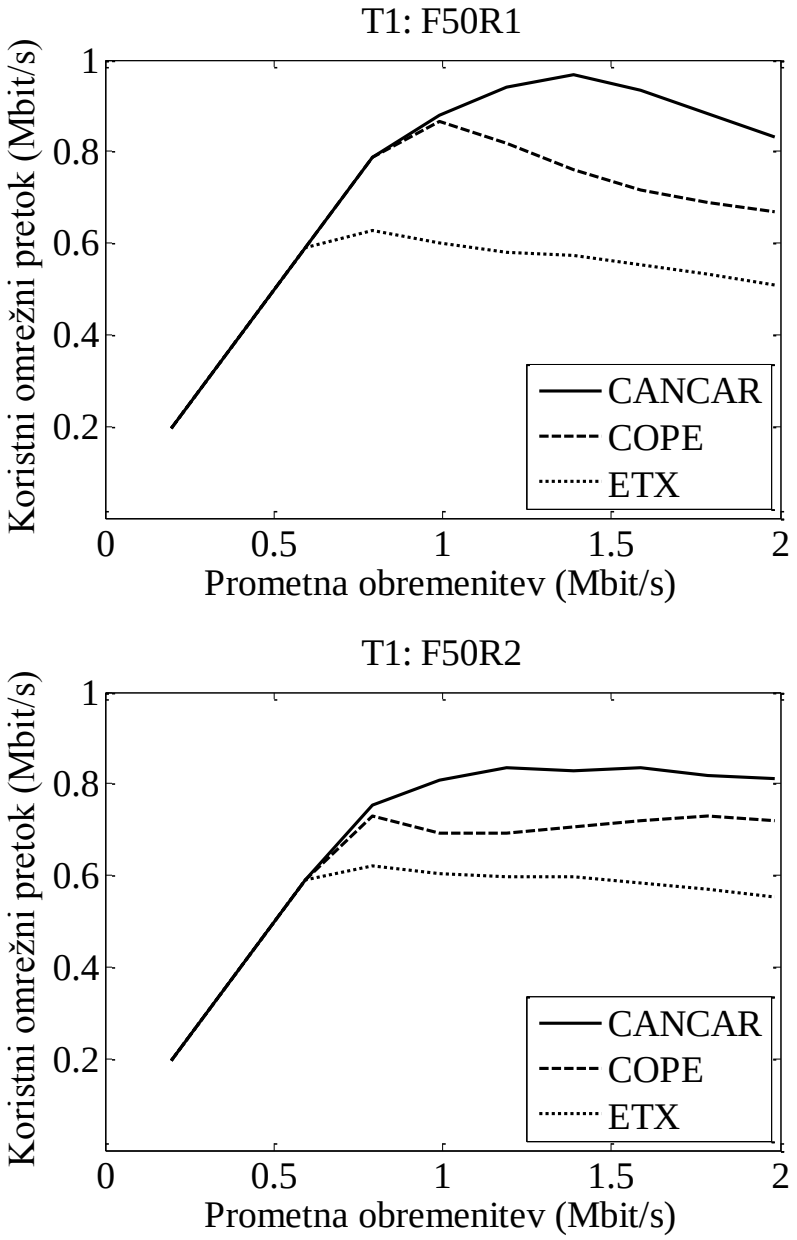
V vseh topologijah postane dobitek postopka CANCAR, v smislu koristnega omrežnega pretoka, najbolj opazen pri višjih prometnih obremenitvah. V topologiji T_1 se izkaže postopek CANCAR najboljše. Medtem ko doseže postopek COPE do 45 % dobitek nad postopkom ETX, doseže postopek CANCAR do 30 % dodatni dobitek nad postopkom COPE. V topologiji T_2 so koristi uporabe postopka COPE do 39 % večje kot pri uporabi postopka ETX, medtem ko so koristi uporabe postopka CANCAR do 28 % večje kot pri uporabi postopka COPE. V topologiji T_3 ima postopek COPE največji doprinos v primerjavi s

postopkom ETX; koristi uporabe postopka COPE so za 61 % večje kot pri uporabi postopka ETX. Tukaj ima postopek CANCAR najmanjši doprinos v primerjavi s postopkom COPE, in sicer 15 %. V tabeli 5.3 so tudi povzeti maksimalni dobitki postopka CANCAR nad postopkom COPE za vse predstavljene scenarije na slikah v tem poglavju.

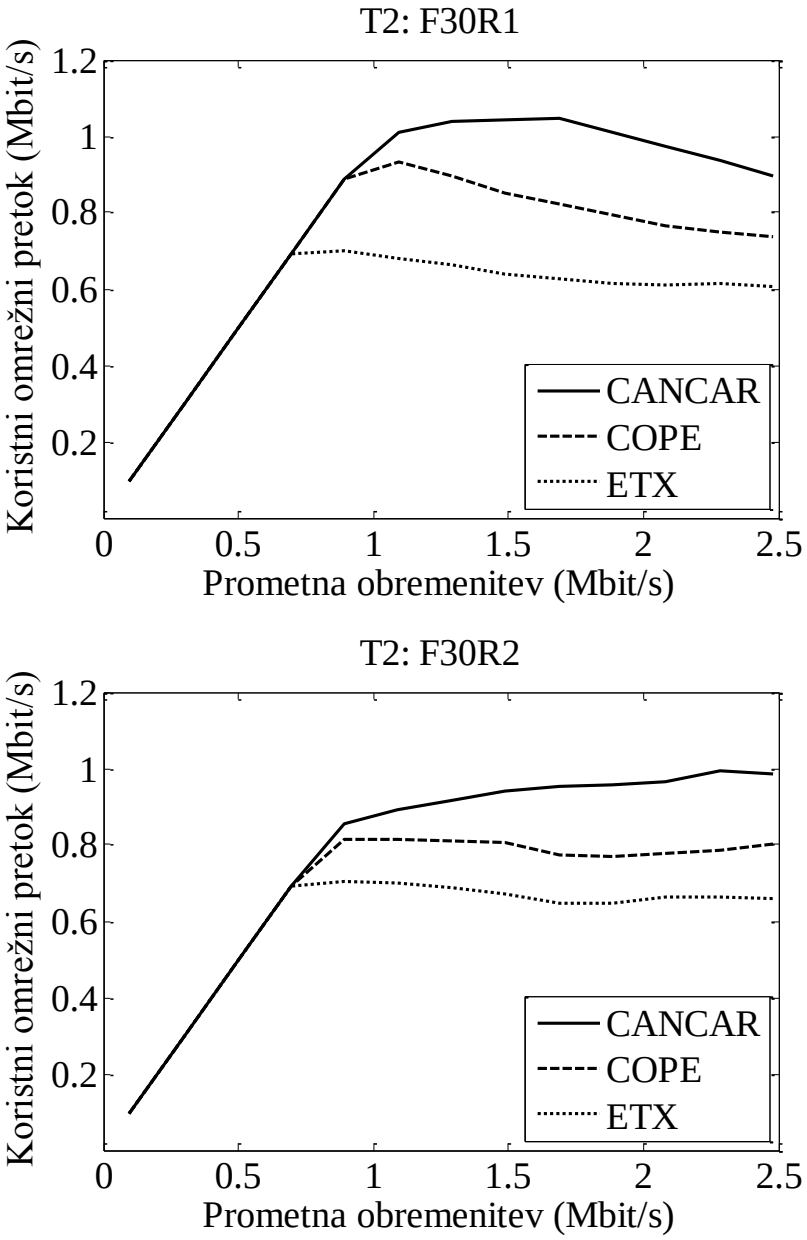
Simulacijski rezultati nadalje potrjujejo, da so koristi uporabe tako postopka CANCAR kot tudi postopka COPE močno odvisne od omrežne topologije in porazdelitve prometa v omrežju. To potrjuje ugotovitve glede koristnosti uporabe omrežnega kodiranja v brezžičnih zankastih omrežjih, predstavljene v (Gajic, Riihijärvi, & Mähönen, 2009; Qazi & Grandhi, 2007).



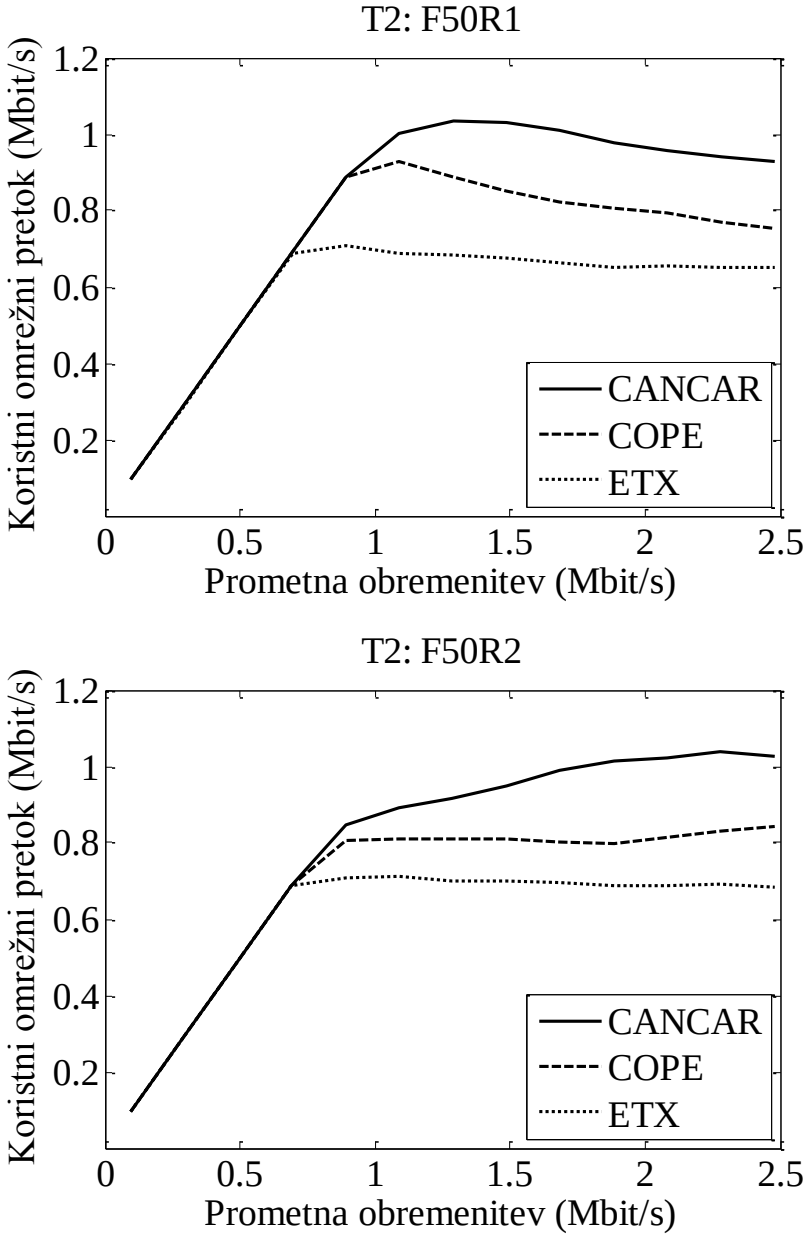
Slika 5.8: Koristni omrežni pretok za topologijo T1 za dva prometna scenarija: (a) simetričen pretok 30 dvosmernih prometnih tokov F30R1, (b) asimetričen pretok 30 dvosmernih prometnih tokov F30R2.



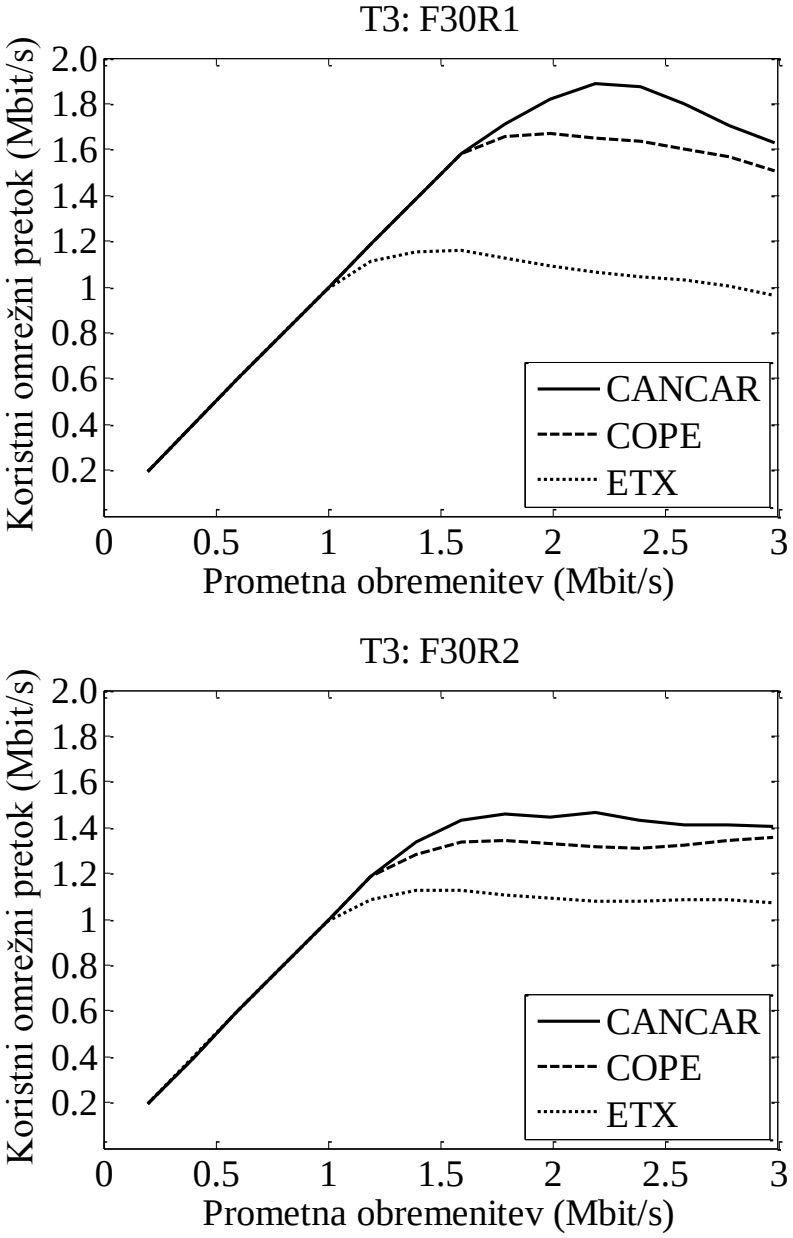
Slika 5.9: Koristni omrežni pretok za topologijo T1 za dva prometna scenarija: (a) simetričen pretok 50 dvosmernih prometnih tokov F50R1, (b) asimetričen pretok 50 dvosmernih prometnih tokov F50R2.



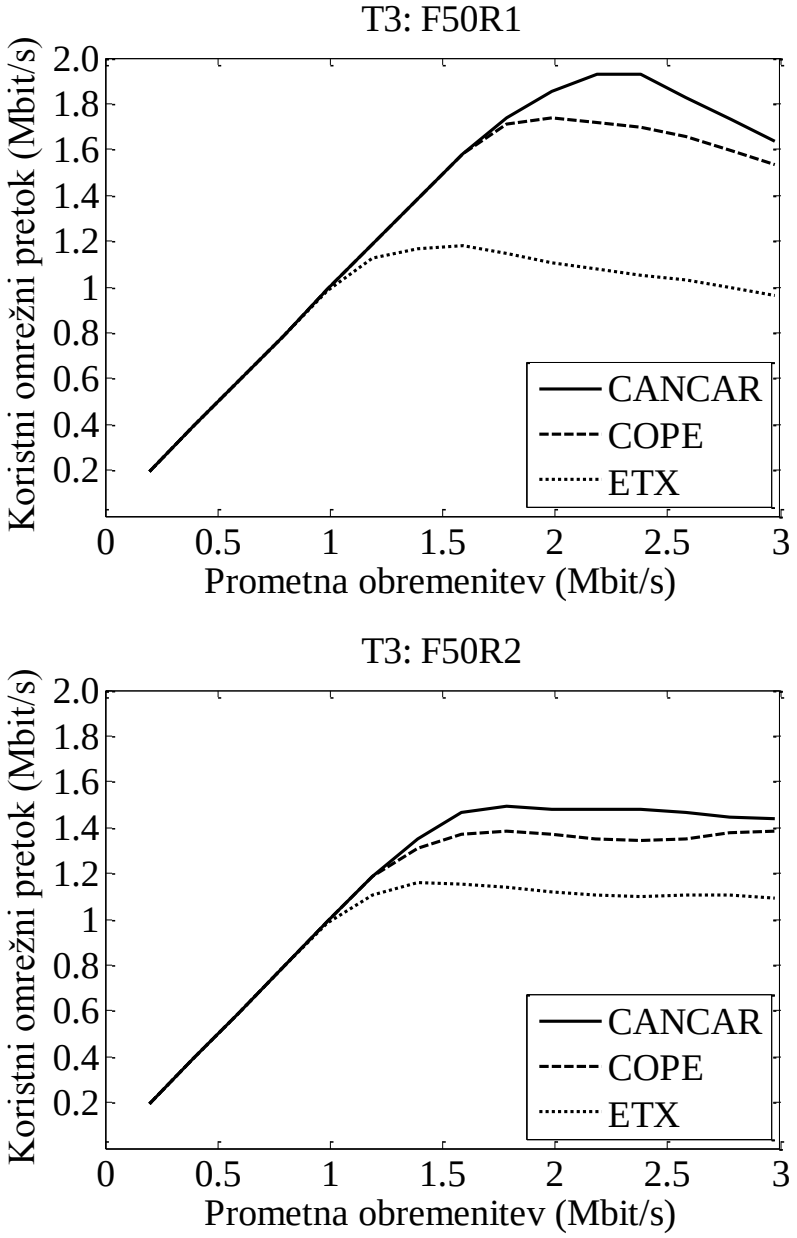
Slika 5.10: Koristni omrežni pretok za topologijo T2 za dva prometna scenarija: (a) simetričen pretok 30 dvosmernih prometnih tokov F30R1, (b) asimetričen pretok 30 dvosmernih prometnih tokov F30R2.



Slika 5.11: Koristni omrežni pretok za topologijo T2 za dva prometna scenarija: (a) simetričen pretok 50 dvosmernih prometnih tokov F50R1, (b) asimetričen pretok 50 dvosmernih prometnih tokov F50R2.



Slika 5.12: Koristni omrežni pretok za topologijo T3 za dva prometna scenarija: (a) simetričen pretok 30 dvosmernih prometnih tokov F30R1, (b) asimetričen pretok 30 dvosmernih prometnih tokov F30R2.



Slika 5.13: Koristni omrežni pretok za topologijo T3 za dva prometna scenarija: (a) simetričen pretok 50 dvosmernih prometnih tokov F50R1, (b) asimetričen pretok 50 dvosmernih prometnih tokov F50R2.

Tabela 5.3: Maksimalni dobitki postopka CANCAR v primerjavi s postopkom COPE v topologijah T1, T2 in T3 z različnimi scenariji prometne obremenitve.

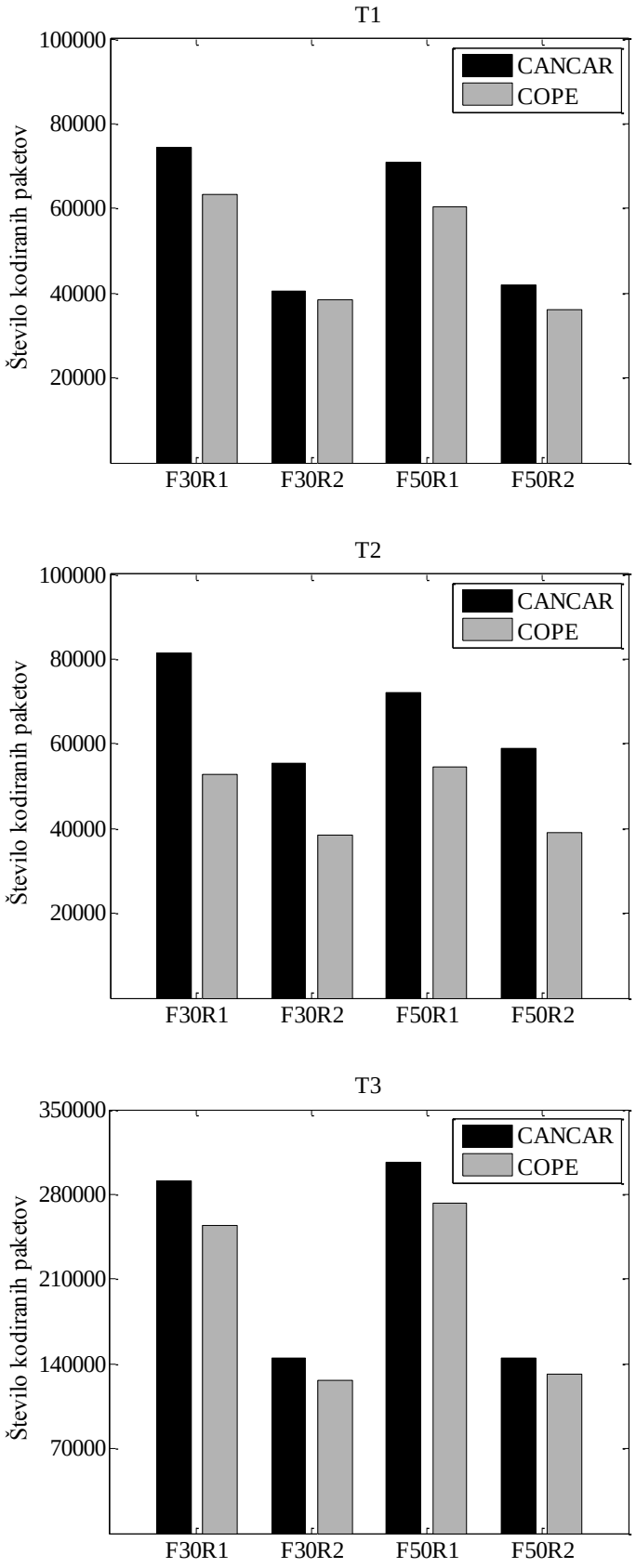
Scenarij	Dobitki [%]		
	T_1	T_2	T_3
F30R1	25	28	15
F30R2	15	26	11
F50R1	30	22	14
F50R2	23	28	10

5.2.2.2 Število kodiranih paketov

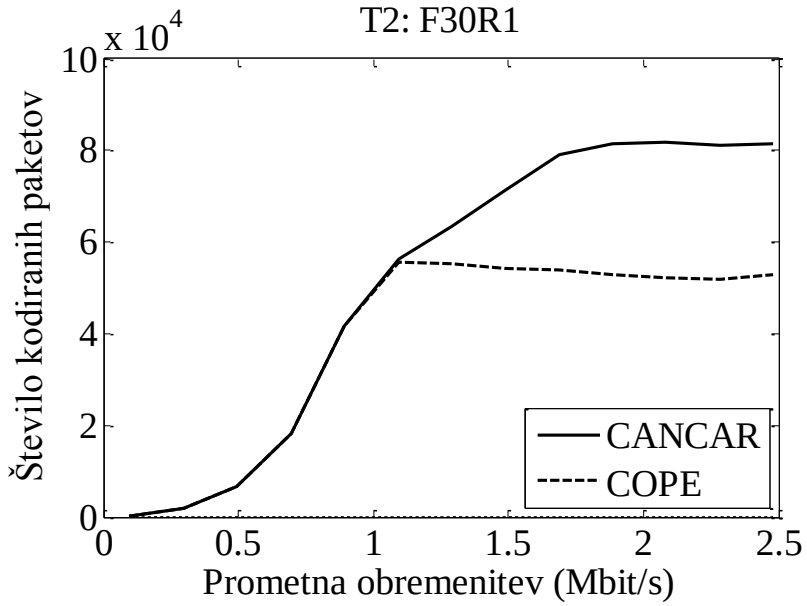
Nadalje smo opazovali učinke kodiranja pri postopku CANCAR v primerjavi s postopkom COPE v smislu števila kodiranih paketov. Primerjava rezultatov je predstavljena na sliki 5.14 za iste scenarije kot na slikah v poglavju 5.2.2.1. Za vsak scenarij so predstavljeni rezultati za prometno obremenitev v omrežju enako 1,4 Mbit/s za topologijo T_1, 1,9 Mbit/s za topologijo T_2 in 2,2 Mbitov/s za topologijo T_3. Pri predstavljenih prometnih obremenitvah je koristni omrežni pretok pri svojem maksimumu.

Rezultati jasno kažejo, da se z uporabo postopka CANCAR uspe kodirati več paketov ne glede na topologijo ali razporeditev prometne obremenitve.

Na sliki 5.15 predstavljamo tudi število kodiranih paketov v odvisnosti od obremenjenosti omrežja za postopka CANCAR in COPE v topologiji T_2, ko generiramo 30 simetričnih (UL/DL=1) dvosmernih prometnih tokov. Vidimo lahko, da se v primeru uporabe postopka CANCAR kodira več paketov, ko so koristi uporabe postopka CANCAR večje od koristi uporabe postopka COPE na slikah v poglavju 5.2.2.1, podobno kot to velja za referenčna scenarija v poglavju 5.2.1.3.



Slika 5.14: Primerjava števila kodiranih paketov v topologijah T1, T2 in T3 z različnimi scenariji prometne obremenitve in uporabljenimi usmerjevalnimi postopki.

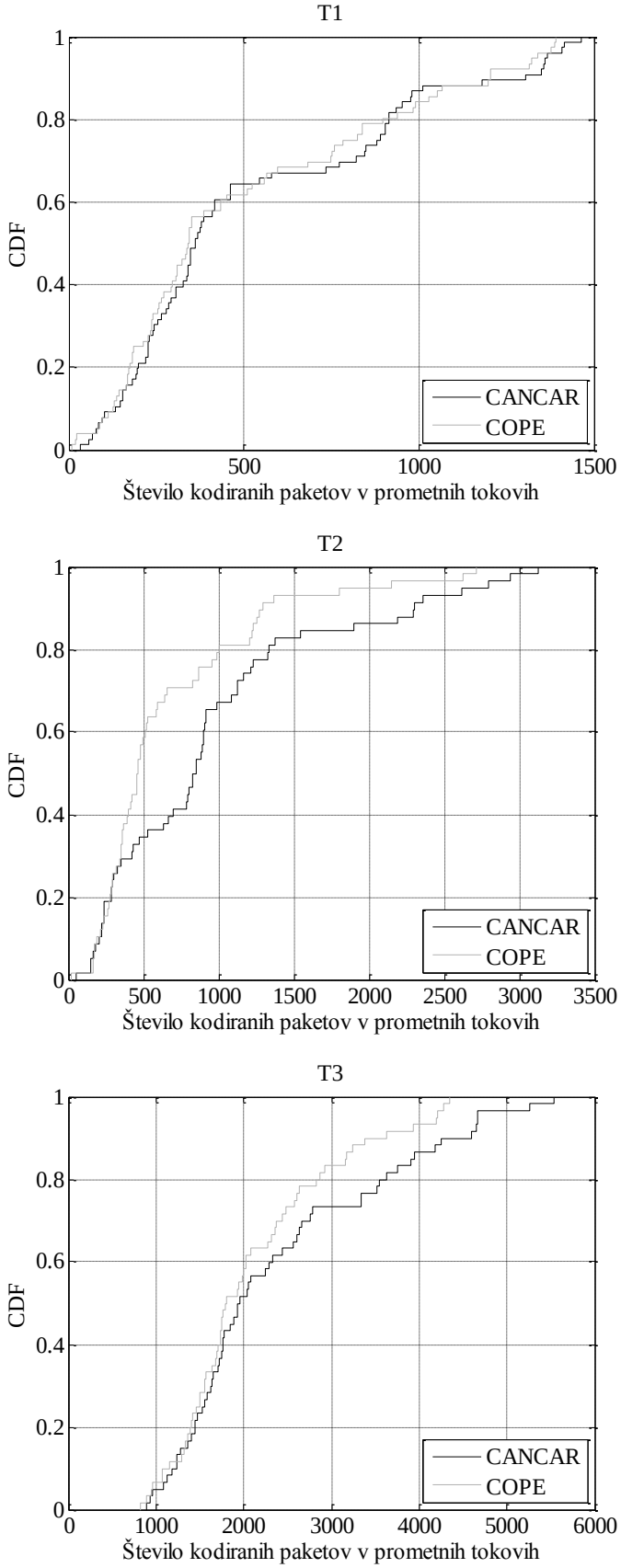


Slika 5.15: Število kodiranih paketov za postopka COPE in CANCAR v odvisnosti od obremenjenosti omrežja v topologiji T2 pri scenariju F30R1.

5.2.2.3 Priložnosti za kodiranje v prometnih tokovih

V tem poglavju predstavljamo rezultate podrobne analize uspešnosti kodiranja v prometnih tokovih. Analizirali smo vse prometne tokove v omrežju s poudarkom na opazovanju, kako se z uporabo postopka CANCAR spremeni kodiranje v prometnih tokovih v primerjavi z uporabo postopka COPE. Na sliki 5.16 je prikazana kumulativna porazdelitvena funkcija (CDF) števila kodiranih paketov v posameznih prometnih tokovih v omrežju za oba postopka. Predstavljeni rezultati so za primer s 30 dvosmernimi prometnimi tokovi (F30) in razmerjem UL/DL enakim R_2=1/3 (F30R2) ter iste prometne obremenitve kot na sliki 5.14, to je 1,4 Mbit/s za T_1, 1,9 Mbit/s za T_2 in 2,2 Mbit/s za T_3.

Čeprav se vsi prometni tokovi generirajo z enako intenzivnostjo, se kodirajo različno, saj se za vsak prometni tok pojavi različna količina priložnosti za kodiranje vzdolž usmerjevalne poti skozi omrežje. Ta zavisi od količine kodirnih struktur, ki se pojavijo na usmerjevalni poti, ter količine prometa v tem delu omrežja. V vsakem primeru pa je število kodiranih paketov v prometnih tokovih običajno večje pri postopku CANCAR, pri katerem je več prometnih tokov z večjim številom kodiranih paketov in manj prometnih tokov z manjšim številom kodiranih paketov. S povečevanjem prometne obremenitve se povečuje tudi razlika v številu kodiranih paketov v prometnih tokovih pri postopku CANCAR in COPE.



Slika 5.16: Kumulativna porazdelitvena funkcija (CDF) števila kodiranih paketov v posameznih prometnih tokovih v topologijah T1, T2 in T3 pri uporabi usmerjevalnih postopkov COPE in CANCAR.

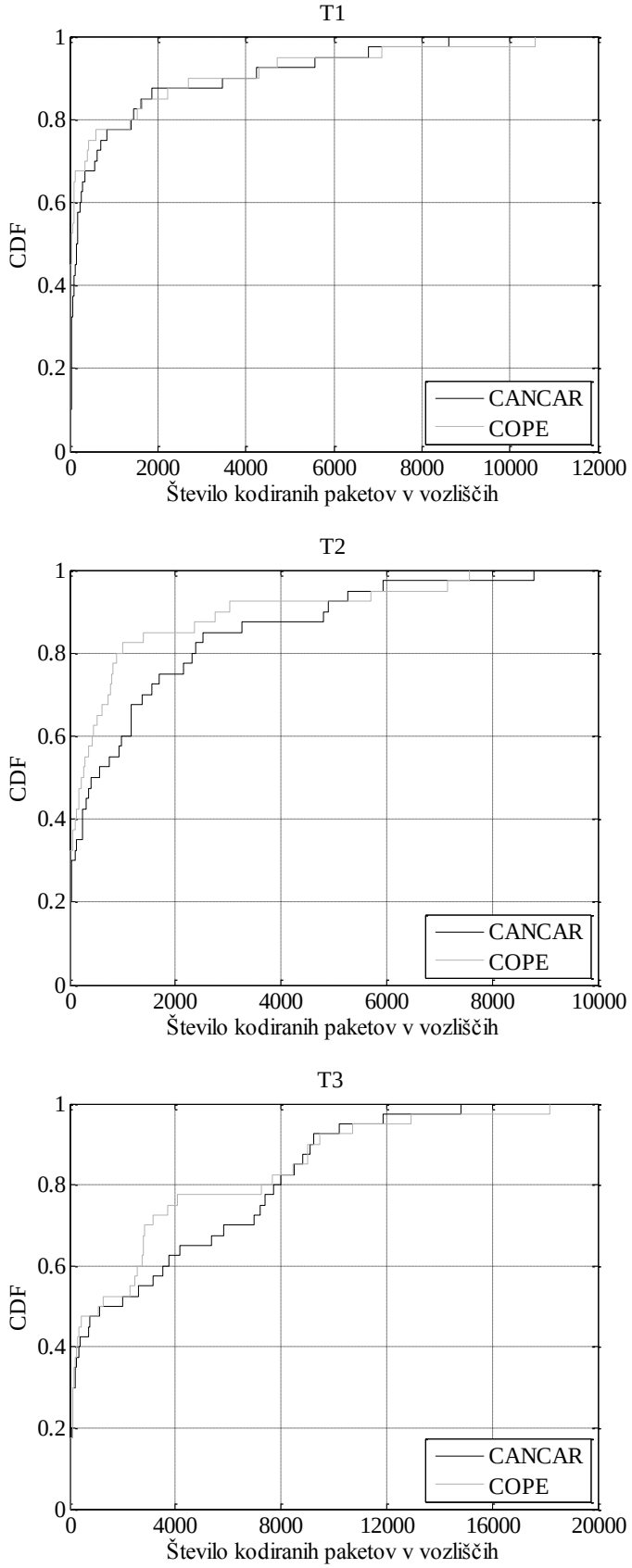
5.2.2.4 Priložnosti za kodiranje na vozliščih

Podobno smo analizirali tudi uspešnost kodiranja na vozliščih v različnih omrežnih topologijah. V ta namen je na sliki 5.17 predstavljena kumulativna porazdelitvena funkcija (CDF) števila kodiranih paketov na posameznem vozlišču v omrežju za iste primere kot v poglavju 5.2.2.3.

Kot lahko razberemo iz slike 5.17, je v splošnem le nekaj vozlišč (eno ali dve), na katerih se kodira večina prometnih tokov v omrežju. V omrežnih topologijah, kot so prikazane na sliki 5.7, je običajno eno ozko grlo, v katerem je zelo veliko prometa. Vozlišča v tem delu omrežja prispevajo večino h kodiranemu prometu. To je bilo tudi raziskano in predstavljeno v (Alič, Pertovt, & Švigelj, Network Topologies and Traffic Distribution Evaluation for Network Coding, 2012), kar nas je tudi motiviralo, da smo razvili postopek, ki zazna najbolj obremenjen del omrežja.

Poleg tega je običajno število vozlišč z velikim številom kodiranih paketov pri uporabi postopka CANCAR enako ali manjše kot pri uporabi postopka COPE. Cilj uporabe omrežnega kodiranja ni doseči maksimalno število priložnosti za kodiranje na vozliščih v omrežju, ki se ga lahko doseže tudi s prometno preobremenitvijo nekaterih delov omrežja, temveč povečanje celotnega koristnega omrežnega pretoka s pomočjo priložnostnega kodiranja z upoštevanjem prometne obremenitve in interference v omrežju, kar počne postopek CANCAR.

Za postopek CANCAR lahko ugotovimo tudi, da je ob njegovi uporabi manj vozlišč z manjšim številom kodiranih paketov. To je posledica dejstva, da po preusmeritvi slabše kodiranih prometnih tokov iz najbolj obremenjenih delov omrežja kodirajo nekatera vozlišča več paketov kot pri uporabi postopka COPE. Kot končen rezultat se z uporabo postopka CANCAR kodira več paketov na vozliščih v omrežju, kot predstavljeno tudi na sliki 5.14.

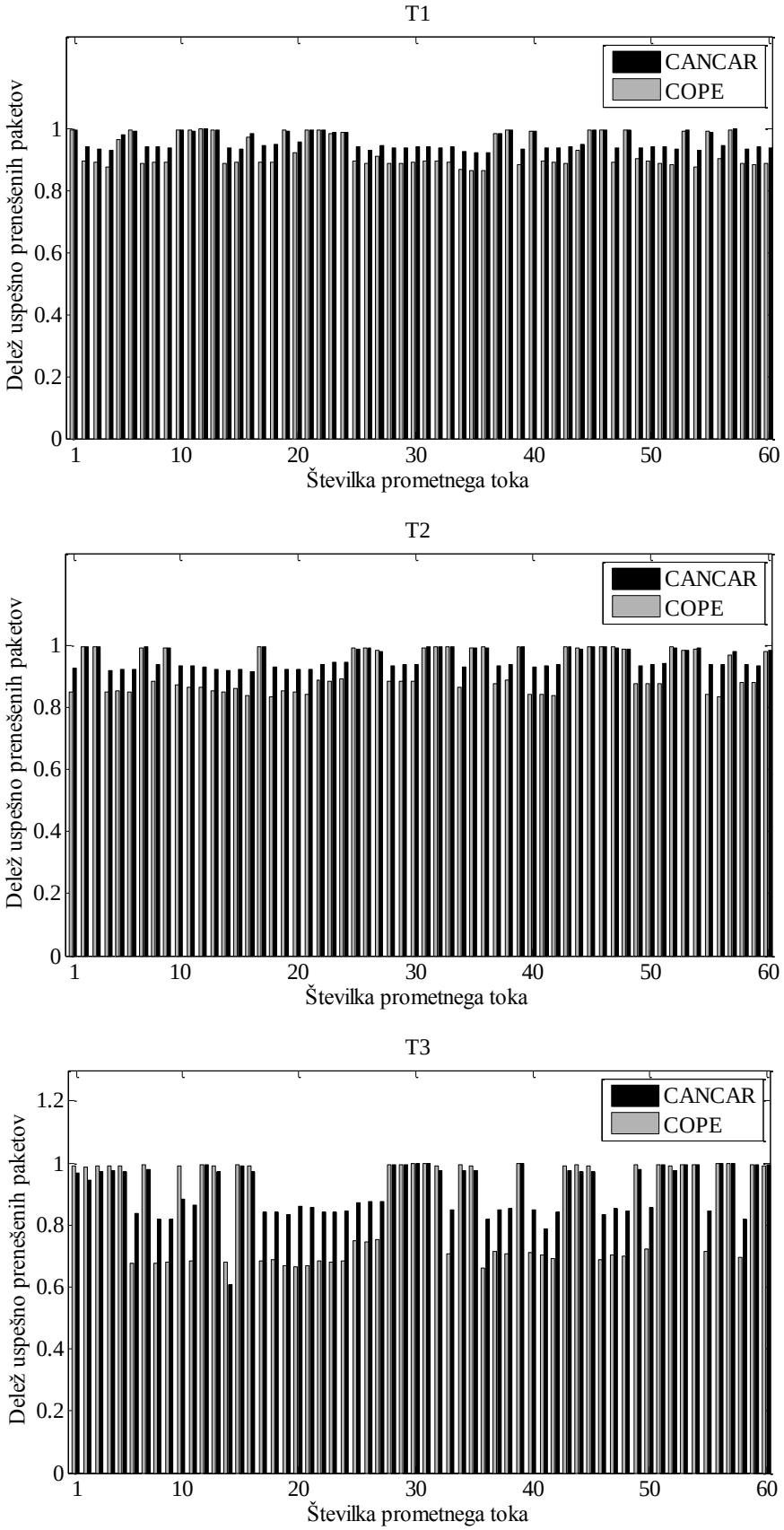


Slika 5.17: Kumulativna porazdelitvena funkcija (CDF) števila kodiranih paketov v vozliščih v topologijah T1, T2 in T3 pri uporabi usmerjevalnih postopkov COPE in CANCAR.

5.2.2.5 Uspešnost prenosa paketov pri posameznem prometnem toku

Na sliki 5.18 predstavljamo delež uspešno prenesenih paketov pri posameznem prometnem toku za postopek CANCAR in COPE. Predstavljeni rezultati so za primer F30R2 za prometno obremenitev v omrežju enako 0,8 Mbitov/s za topologijo T_1, 0,9 Mbitov/s za topologijo T_2 in 1,6 Mbitov/s za topologijo T_3. Pri predstavljenih prometnih obremenitvah omrežni pretok še vedno narašča približno konstantno pri uporabi postopka CANCAR, vendar ne narašča več pri uporabi postopkov COPE in ETX. Pri uporabi postopka CANCAR je v vseh treh topologijah delež uspešno prenesenih paketov večji ali rahlo večji kot pri postopku COPE za vse prometne tokove v omrežju. To potrjuje, da postopek CANCAR ne povečuje celotnega omrežnega pretoka na račun zmanjšanja pretoka nekaterih prometnih tokov; oziroma vsaj ne poslabšuje v tem oziru delovanja v primerjavi s postopkom COPE.

Postopek CANCAR ne izbira usmerjevalnih poti, na katerih so vozlišča podobno obremenjena kot najbolj obremenjeno vozlišče. S tem prepreči, da bi se razmere za ostale prometne tokove v omrežju poslabšale.



Slika 5.18: Delež uspešno prenešenih paketov pri posameznem prometnem toku v topologijah T1, T2 in T3 pri uporabi usmerjevalnih postopkov COPE in CANCAR.

5.2.2.6 Ocena režijskih stroškov

Režijski stroški usmerjanja s pomočjo usmerjevalnega postopka CANCAR v primerjavi z režijskimi stroški tradicionalnega usmerjanja z metriko ETX so tudi v tem primeru primerljivi oziroma še bolj primerljivi kot v referenčnih scenarijih zaradi večjega števila vozlišč (40 vozlišč v primerjavi z referenčnima scenarijema s 23 vozlišči).

Najbolj obremenjeno vozlišče mora preusmeriti do 10 prometnih tokov. Za preusmeritev teh tokov mora poslati le 10 dodatnih izvornih paketov (za kratka poročila) do pripadajočih ponorov, kar povzroči le 0,6 odstotno povečanje števila izvornih paketov za informacijo o usmerjanju, v primeru uporabe postopka CANCAR, v primerjavi z usmerjanjem na podlagi metrike ETX, kar je zanemarljivo v primerjavi s paketi s koristno informacijo; odstotek povečanja režijskih stroškov za postopek CANCAR pa je tako kot za referenčne scenarije še veliko manjši od te številke, kar je predstavljeno v poglavju 3.4.

Povečanje števila bitov v sporočilu za informacijo o usmerjanju je še vedno 8 bitov tako kot pri referenčnih scenarijih.

5.2.3 Povzetek rezultatov

Povzamemo lahko, da postopek CANCAR vidno izboljša delovanje brezžičnih zankastih omrežij v primerjavi s postopkom COPE. Pokazali smo, da lahko s pomočjo pravilne rabe informacije o izmerjeni uspešnosti pri kodiranju za potrebe usmerjanja za preprečevanje nasičenja izboljšamo delovanje omrežja in potencialno povečamo število kodiranih paketov. To potrjuje tezo, da lahko s pomočjo zavedanja uporabe omrežnega kodiranja preko uporabe informacije o uspešnosti pri kodiranju učinkovito usmerjamo promet in preprečimo pojav zasičenja v omrežju.

Poglavje 6

Zaključki

V doktorski disertaciji predlagamo dinamični usmerjevalni postopek CANCAR, ki je zasnovan na zavedanju uporabe kodiranja v omrežju. Cilj predlaganega postopka je porazdeljeno dinamično usmerjanje za preprečevanje nasičenja v brezžičnih zankastih omrežjih. Postopek CANCAR smo implementirali kot proaktiven etapen usmerjevalni postopek na podlagi stanja povezav, ki temelji na obstoječem tradicionalnem usmerjanju in omrežno kodirnem postopku COPE, je pa primeren za uporabo s poljubnim postopkom omrežnega kodiranja. Postopek s pomočjo algoritma za izbor alternativnih poti upošteva gostoto prometa v ozkih grlih omrežja in uspešnost pri kodiranju posameznih prometnih tokov. Algoritem se uporabi v kombinaciji s tradicionalnimi usmerjevalnimi postopki za učinkovito prilagoditev predlaganega usmerjanja obstoječim usmerjevalnim vzorcem.

Usmerjevalni postopek CANCAR smo implementirali v simulacijskem okolju OPNET Modeler. S pomočjo simulacij smo ovrednotili njegovo delovanje v primerjavi z referenčnim postopkom COPE in tudi usmerjevalnim postopkom brez uporabe omrežnega kodiranja, ki temelji le na metriki ETX. Prednosti uporabe postopka CANCAR so očitne. Ta učinkovito razbremeni najbolj obremenjen del omrežja s preusmeritvijo prometnih tokov, ki se v tem delu omrežja najslabše kodirajo, na alternativne povezave. S pomočjo tega uspe postopek CANCAR kodirati več paketov kot sam postopek COPE in nadalje izboljšati delovanje omrežja v smislu koristnega omrežnega pretoka.

Postopek CANCAR potrjuje ustreznost uporabe informacije o izmerjeni uspešnosti kodiranja prometa na vozliščih za potrebe usmerjanja v omrežju. Izčrpni rezultati simulacij pokažejo, da postopek CANCAR doseže do 30 % dobitka v smislu koristnega omrežnega pretoka nad postopkom COPE, kjer se uporabi usmerjanje brez zavedanja uporabe omrežnega kodiranja (uporabljeno tudi v (Katti, Rahul, Hu, Katabi, Médard, & Crowcroft, 2008)).

V dejanskih (realnih) okoljih, kjer ni prisotne žične oziroma optične telekomunikacijske infrastrukture, lahko pričakujemo, da bomo v omrežjih prihodnosti, kot so kognitivna omrežja, s postopkom CANCAR in inovativnimi koncepti kognitivnega usmerjanja v brezžičnih zankastih omrežjih, kjer lahko izbiramo različne frekvenčne kanale sprejemanja in oddajanja, dosegali podobne ali celo večje dobitke, kot smo jih dosegli s pomočjo simulacij.

V okviru nadaljnjega dela bi bilo potrebno za postopek CANCAR raziskati način in tehniko za distribucijo informacije, ki je potrebna za usmerjanje prometa preko omrežja. Oboje je do neke mere tudi odvisno od omrežne topologije in prometa v omrežju. Zato je potrebna ločena raziskava za učinkovito distribucijo informacije za usmerjanje. Z raziskavo bi se ugotovilo, katera tehnika je najučinkovitejša za distribucijo te informacije pri različnih konkretnih topologijah in prometnih scenarijih.

Prav tako bi bilo potrebno za postopek CANCAR raziskati, v katerih tipih omrežnih topologij in prometnih scenarijev je doprinos postopka CANCAR največji, v katerih pa uporaba postopka CANCAR ne prinaša bistvenih koristi.

Postopek CANCAR bi se lahko tudi optimiziralo na podlagi ugotovitev iz zgornjih raziskav. Pri izračunu alternativnih poti bi bilo potrebno testirati upoštevanje več najbolj obremenjenih vozlišč v omrežju in ne le enega, kot se upošteva to sedaj. Raziskati bi bilo potrebno doprinos, ki bi ga prinesla sprememba. Preveriti bi bilo potrebno povečanje režijskih stroškov za distribucijo informacije zaradi spremembe ter nadalje raziskati morebitne potrebne nove načine in tehnike za distribucijo informacije za novo usmerjanje. Prav tako bi lahko pri optimizaciji postopka CANCAR upoštevali zgodovino informacije o

usmerjanju ter na podlagi slednje pametneje izbirali med najkrajšimi in alternativnimi potmi.

Literatura

OPNET web page. (2014). Prevzeto September 2014 iz http://www.riverbed.com/products/performance-management-control/opnet.html

Abdelaziz, S., & Einainay, M. (2012). *Survey of Routing Protocols in Cognitive Radio Networks.* Prevzeto 29. August 2015 iz Wireless Research Center: http://wrc-ejust.org/crn/images/Surveys/RPCRNs.pdf

Aguayo, D., Bicket, J., Biswas, S., Judd, G., & Morris, R. (2004). Link-level measurements from an 802.11b Mesh Network. *Proceedings of the 2004 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications (ACM SIGCOMM '04)* (str. 121-132). New York, NY, USA: ACM.

Ahlswede, R., Cai, N., Li, S.-Y., & Yeung, R. (2000). Network Information Flow. *IEEE Transactions on Information Theory, 46*(4), 1204–1216.

Akyildiz, I., & Wang, X. (2005). A survey on wireless mesh networks. *IEEE Communication Magazine, 43*(9), S23–S30.

Alič, K., Pertovt, E., & Švigelj, A. (2011). Simulation environment for network coding. *Proceedings of the Mosharaka International Conference on Communications, Networking and Information Technology (MICCNIT 2011)*, (str. 25C–231). Dubai, UAE.

Alič, K., Pertovt, E., & Švigelj, A. (2012). Network coding simulation model in OPNET Modeler. *OPNETWORK 2012.* Washington, D.C., USA.

Alič, K., Pertovt, E., & Švigelj, A. (2012). Network Topologies and Traffic Distribution Evaluation for Network Coding. *Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Mesh Networks (MESH 2012)*, (str. 20–27). Rome, Italy.

Athanasiadou, G., Wassell, I., & Hong, C. (2004). Deterministic Propagation Modelling and Measurements for the Broadband Fixed Wireless Access Channel. *2004 IEEE 60th Vehicular Technology Conference (VTC2004-Fall)* (str. 76-80). Los Angeles, CA, USA: IEEE.

Baccour, N., Koubaa, A., Mottola, L., Zuniga, M., Youssef, H., Boano, C., in drugi. (2012). Radio link quality estimation in wireless sensor networks: a survey. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 8*(4), 34.

Baras, J., Papageorgiou, G., Tabatabaee, V., Shang, Y., & Rentz, N. (2007). Loss Model Approximations and Sensitivity Computations for Multi-Hop Wireless Network Design. *Proceedings of the IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2007)* (str. 1-7). Orlando, FL, USA: IEEE.

Bertsekas, D., & Gallager, R. (1987). *Data Networks.* Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall.

Bicket, J., Aguayo, D., Biswas, S., & Morris, R. (2005). Architecture and evaluation of an unplanned 802.11b mesh network. *Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking (ACM MobiCom '05)* (str. 31-42). New York, NY, USA: ACM.

Cesana, M., Cuomo, F., & Ekici, E. (2011). Routing in cognitive radio networks: Challenges and solutions. *Ad Hoc Networks, 9*(3), 228-248.

Chatzigiannakis, I., Mylonas, G., & Nikoletseas, S. (2007). A Model for Obstacles to be used in Simulations of Wireless Sensor Networks and its Application in studying Routing Protocol Performance. *Journal Simulation, 83*(9), 643-661.

Che-Aron, Z., Abdalla, A., Abdullah, K., & Mahmoud, O. (2013). A Comprehensive Study of Routing Protocols for Cognitive Radio Networks. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology, 47*(2), 521-536.

Chi, K., Jianf, X., & Horiguchi, S. (2008). Network Coding Opportunity Analysis of COPE in Multihop Wireless Networks. *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2008)*, (str. 2858–2863). Las Vegas, NV, USA.

De Couto, D. S., Aguayo, D., Bicket, J., & Morris, R. (2003). A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. *Proceedings of the 9th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '03)*, (str. 134–146). New York, NY, USA.

Draves, R., Padhye, J., & Zill, B. (2004). Routing in multi-radio multi-hop wireless mesh networks. *Proceedings of the 10th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '04)*, (str. 114–128). New York, NY, USA.

Gajic, B., Riihijärvi, J., & Mähönen, P. (2009). Performance evaluation of Network Coding: Effects of Topology and Network Traffic for Linear and XOR Coding. *Journal of Communications, 4*(11), 885-893.

Guo, B., Li, H., Zhou, C., & Cheng, Y. (2011). Analysis of general network coding conditions and design of a free-ride-oriented routing metric. *IEEE Transactions on Vehicular Technology, 60*(4), 1714–1727.

Hamida, E., Chelius, G., & Gorce, J. (2009). Impact of the Physical Layer Modeling on the Accuracy and Scalability of Wireless Network Simulation. *Journal Simulation, 85*(9), 574-588.

Hu, C., & Hou, J. (2005). A Reactive Channel Model for Expediting Wireless Network Simulation. *Proceedings of the 2005 ACM SIGMETRICS international conference on Measurement and modeling of computer systems (SIGMETRICS '05)* (str. 410-411). New York, NY, USA: ACM.

Iqbal, M., Dai, B., Huang, B., Hassan, A., & Yu, S. (2011). Survey of network coding-aware routing protocols in wireless networks. *Journal of Network and Computer Applications, 34*(6), 1956–1970.

Jacquet, P., Mühlethaler, P., Clausen, T., Laouiti, A., Qayyum, A., & Viennot, L. (2001). Optimized Link State Routing Protocol for Ad Hoc Networks. *Technology for the 21st Century : Proceedings of the IEEE International Multitopic Conference (IEEE INMIC 2001)* (str. 62-68). Lahore, Pakistan: IEEE.

Jain, A. (2012). *Routing in Cognitive Network.* Mumbai, Maharasthra, India: Indian Institute of Technology.

Jhang, M., Lin, S., & Liao, W. (2010). C2AR: coding and capacity aware routing for wireless ad hoc networks. *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC 2010)* (str. 1–5). Cape Town, South Africa: IEEE.

Jiao, X., Wang, X., & Zhou, X. (2008). Active network coding based high-throughput optimizing routing for wireless ad hoc networks. *Proceedings of the 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM '08)*, (str. 1–5). Dalian, China.

Johnson, D., & Maltz, D. (1996). Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks. V T. Imielinski, & H. Korth, *Mobile Computing* (str. 153-181). Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers.

Katti, S., Rahul, H., Hu, W., Katabi, D., Médard, M., & Crowcroft, J. (2008). XORs in the Air: Practical Wireless Network Coding. *IEEE/ACM Transactions on Networking, 16*(3), 497–510.

Kotz, D., Newport, C., & Elliott, C. (2003). *The mistaken axioms of wireless-network research.* Department of Computer Science. Hanover, NH, USA: Dartmouth College.

Le, J., Lui, J. C., & Chiu, D.-M. (2010). DCAR: distributed coding-aware routing in wireless networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing, 9*(4), 596–608.

Liu, J., Yuan, Y., Nicol, D., Gray, R., Newport, C., Kotz, D., in drugi. (2005). Empirical Validation of Wireless Models in Simulations of Ad Hoc Routing Protocols. *Simulation, 81*(4), 307-323.

Newport, C., Kotz, D., Yuan, Y., Gray, R., Liu, J., & Elliott, C. (2007). Experimental Evaluation of Wireless Simulation Assumptions. *Journal Simulation, 83*(9), 643-661.

Ni, B., Santhapuri, N., Zhong, Z., & Nelakuditi, S. (2006). Routing with opportunistically coded exchanges in wireless mesh networks. *Proceedings of the IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks (WiMesh '06)*, (str. 157–159). Reston, VA, USA.

Peng, Y., Yang, Y., Lu, X., & Ding, X. (2010). Coding-aware routing for unicast sessions in multi-hop wireless networks. *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*, (str. 1–5). Miami, FL, USA.

Perkins, C., & Bhagwat, P. (1993). Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers. *Proceedings of the conference on Communications architectures, protocols and applications (ACM SIGCOMM '94)* (str. 234-244). New York, NY, USA: ACM.

Perkins, C., & Royer, E. (1999). Ad-hoc on-demand distance vector routing. *Proceedings of the 2th IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA '99)*, (str. 90–100). Washington, DC, USA.

Pertovt, E., Alič, K., Mohorčič, M., & Švigelj, A. (2011). ETX-bsed metrics and adapted routing algorithms for network coding. V B. Zajc, & A. Trost (Ured.), *Dvajseta mednarodna Elektrotehniška in računalniška konferenca (ERK 2011)* (str. 124-127). Portorož, Slovenija: IEEE Region 8, Slovenska sekcija IEEE.

Peterson, L., & Davie, B. (2011). *Computer Networks – A System Approach.* San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann.

Qazi, I., & Grandhi, P. (2007). *Performance evaluation of Wireless Network Coding under Practical Settings.* University of Pittsburgh, Department of Computer Science. Pittsburgh, USA: Science and Education Publishing.

Reddy, D., & Riley, G. (2007). Measurement-Based Physical Layer Modeling for Wireless Network Simulations. *Proceedings of the 15th International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS '07)* (str. 46-53). Istanbul, Turkey: IEEE.

Selvakanmani, S., & Sumathi, M. (2012). *A Review of Routing Protocols for Mobile Cognitive Radio Ad Hoc Networks.* Prevzeto April 2014 iz Cornell University Library: http://arxiv.org/abs/1207.5734

Sengupta, S., Rayanchu, S., & Banerjee, S. (2010). Network coding-aware routing in wireless networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking, 18*(4), 1158–1170.

Sun, L., Zheng, W., Rawat, N., Sawant, V., & Koutsonikolas, D. (2013). Performance Comparison of Routing Protocols for Cognitive Radio Networks. *2013 IEEE 21st International Symposium on Modeling, Analysis & Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS 2013)*, (str. 343-364). San Francisco, CA, USA.

Wang, Z. (2010). Coding-aware and interference-avoid routing metric for wireless mesh networks. *Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligence and Awareness Internet (AIAI 2010)*, (str. 424–427). Beijing, China.

Wehrle, K., Gunes, M., & Gross, J. (2010). *Modeling and Tools for Network Simulation.* Springer.

Wei, X., Zhao, L., Xi, J., & Wang, Q. (2009). Network coding aware routing protocol for lossy wireless networks. *Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCom '09)*, (str. 1–4). Beijing, China.

Wu, S., & Biaz, S. (2011). Measurement Based Link Level Investigation of IEEE 802.11g Channels. *International Journal of Computer Networks (IJCNC), 3*(2), 1-12.

Xie, L., Chong, P., Liew, S., & Guan, Y. (2013). Consistency of Encoding and Overhearing in Network Coding-Aware Routing. *IEEE Wireless Communications Letters, 2*(2), 187 - 190.

Yan, Y., Zhao, Z., Zhang, B., Mouftah, H., & Ma, J. (2008). Rate-adaptive coding-aware multiple path routing for wireless mesh networks. *Proceedings of the IEEE Global*

Telecommunications Conference (GLOBECOM 2008), (str. 1–5). New Orleans, LA, USA.

Yang, Y., Wang, J., & Kravets, R. (2005). *Interference-aware Load Balancing for Multihop Wireless Networks.* Technical Report UIUCDCD-R-2005-2526, University of Illinois at Urbana-Champaign, Department of Computer Science, Champaign, IL, USA.

Yeung, G., Takai, M., & Bagrodia, R. (2005). Effects of Detailed OFDM Modeling in Network Simulation. *Journal Simulation, 81*(4), 241-253.

Yifei, L., Cheng, S., Qin, X., & Jun, T. (2009). ICM: a novel coding-aware metric for multi-hop wireless routing. *Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCom '09)*, (str. 1–4). Beijing, China.

Bibliografija

Objave v povezavi z delom

Članki v revijah

Pertovt, E., Alič, K., Švigelj, A., & Mohorčič, M. (V recenziji). CANCAR - Congestion-Avoidance Network Coding-Aware Routing for Wireless Mesh Networks. *Computer Communications*.

Pertovt, E., Alič, K., Švigelj, A., & Mohorčič, M. (2013). Voice over internet protocol in wireless mesh network with opportunistic network coding. *International Journal of Communications, 7*(2), 42-53.

Alič, K., Pertovt, E., & Švigelj, A. (2015). Bearing-opportunistic network coding. *International Journal of Computers, Communications & Control, 10*(2), 154-164.

Prispevki na konferencah

Pertovt, E., Alič, K., Mohorčič, M., & Švigelj, A. (2011). ETX-based metrics and adapted routing algorithms for network coding. *Dvajseta mednarodna Elektrotehniška in računalniška konferenca (ERK 2011)* (str. 124-127). Portorož, Slovenija: IEEE Region 8, Slovenska sekcija IEEE.

Alič, K., Pertovt, E., & Švigelj, A. (2011). Simulation environment for network coding. *Proceedings of Mosharaka International Conference on Communications, Networking and Information Technology (MIC-CNIT2011)* (str. 1-6). Dubai, UAE: Mosharaka.

Alič, K., Pertovt, E., & Švigelj, A. (2011). COPE simulation model. *Dvajseta mednarodna Elektrotehniška in računalniška konferenca (ERK 2011)* (str. 128-131). Portorož, Slovenija: IEEE Region 8, Slovenska sekcija IEEE, 2011.

Pertovt, E., Alič, K., Švigelj, A., & Mohorčič, M. (2012). Simulation model for ant-based control algorithm in wireless mesh networks. *Enaindvajseta mednarodna Elektrotehniška in računalniška konferenca (ERK 2012)* (str. 69-72). Portorož, Slovenija: IEEE Region 8, Slovenska sekcija IEEE.

Pertovt, E., Alič, K., Švigelj, A., & Mohorčič, M. (2012). Improving performance of wireless mesh networks with network coding. *4. študentska konferenca Mednarodne podiplomske šole Jožefa Stefana* (str. 150-156). Ljubljana, Slovenija: Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana.

Alič, K., Pertovt, E., & Švigelj, A. (2012). Network coding simulation model in OPNET modeler. *OPNETWORK 2012* (str. 1-7). Washington, D.C.: OPNET.

Alič, K., Pertovt, E., & Švigelj, A. (2012). Network topologies and traffic distribution evaluation for network coding. *Netware 2012: Proceedings of the Fifth International Conference on Advances in Mesh Networks (MESH 2012)* (str. 20-27). Rome, Italy: IARIA.

Alič, K., Pertovt, E., & Švigelj, A. (2012). Routing-independent practical network coding algorithm. *Enaindvajseta mednarodna Elektrotehniška in računalniška konferenca (ERK 2012)* (str. 65-68). Portorož, Slovenija: IEEE Region 8, Slovenska sekcija IEEE.

Pertovt, E., Alič, K., Švigelj, A., & Mohorčič, M. (2013). Analysis of the basic topology structure for neighbourhood network coding aware routing. *Dvaindvajseta mednarodna Elektrotehniška in računalniška konferenca (ERK 2013)* (str. 37-40). Portorož, Slovenija: IEEE Region 8, Slovenska sekcija IEEE.

Pertovt, E., Alič, K., Švigelj, A., & Mohorčič, M. (2013). Implementation and performance evaluation of ant-based control routing in wireless mesh networks using OPNET modeler. *OPNETWORK 2013*. Washington, D.C., USA: OPNET.

Pertovt, E., Alič, K., Švigelj, A., & Mohorčič, M. (2013). Performance evaluation of VoIP codecs over network coding in wireless mesh networks. *Recent advances in Electronics and Communication Systems : Proceedings of the 2013 International Conference on Electronics and Communication Systems (ECS 2013)*. Rhodes Island, Greece.

Pertovt, E., Alič, K., Švigelj, A., & Mohorčič, M. (2013). Network coding aware routing for performance boost in wireless-mesh-network. *5. študentska konferenca Mednarodne podiplomske šole Jožefa Stefana* (str. 168-173). Ljubljana, Slovenija: Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana.

Druge objave

Pertovt, E. (2010). Prenos operacijskega sistema Contiki na platformo VSN zasnovano na mikrokrmilniku ARM Cortex-M3 [diplomsko delo]. Ljubljana, Slovenija: Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani.

Pertovt, E., Smolnikar, M., Mohorčič, M., & Zajc, M. (2010). Prenos operacijskega sistema Contiki na platformo VSN zasnovano na mikrokrmilniku ARM Cortex-M3. *Devetnajsta mednarodna Elektrotehniška in računalniška konferenca (ERK 2010)* (str. 273-276). Portorož, Slovenija: IEEE Region 8, Slovenska sekcija IEEE.

Pertovt, E., Javornik, T. & Mohorčič, M. (2011). Game theory application for performance optimisation in wireless networks. *Elektrotehniški vestnik, 78*(5), 287-292.

Pertovt, E., Javornik, T. & Mohorčič, M. (2011). Uporaba teorije iger za optimizacijo delovanja brezžičnih omrežij. *Elektrotehniški vestnik, 78*(5), 287-292.

Pertovt, E., Mohorčič, M., & Javornik, T. (2011). Uporaba teorije iger v brezžičnih omrežjih. *Dvajseta mednarodna Elektrotehniška in računalniška konferenca (ERK 2011)* (str. 120-123). Portorož, Slovenija: IEEE Region 8, Slovenska sekcija IEEE.

Biografija

Erik Pertovt se je rodil 11. aprila 1985 v Postojni. Mladost je preživel v Novi Gorici, kjer je obiskoval Osnovno šolo Milojke Štrukelj in podružnično šolo Ledine. Po osnovnošolskem izobraževanju je šolanje nadaljeval na Gimnaziji Nova Gorica in ga uspešno zaključil z maturo leta 2004. Istega leta se je vpisal na študij elektrotehnike na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani in v tretjem letniku izbral študijsko smer Telekomunikacije. Kot absolvent se je pridružil Odseku za komunikacijske sisteme E6 na Institutu »Jožef Stefan«, kjer je pod mentorstvom izr. prof. dr. Mateja Zajca in somentorstvom izr. prof. dr. Mihaela Mohorčiča pripravil diplomsko delo z naslovom Prenos operacijskega sistema Contiki na platformo VSN zasnovano na mikrokrmilniku ARM Cortex-M3. Leta 2010 je z odliko diplomiral iz smeri Telekomunikacije na Fakulteti za elektrotehniko.

Po uspešnem izboru na razpisu Mladi raziskovalci generacija 2010 Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije se je leta 2010 zaposlil kot mladi raziskovalec na Institutu »Jožef Stefan« in vpisal podiplomski doktorski študij iz smeri Informacijske in komunikacijske tehnologije na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana.

Raziskovalna področja Erika Pertovta zajemajo dinamično usmerjanje in omrežno kodiranje v brezžičnih omrežjih ter uporabo teorije iger za optimizacijo delovanja brezžičnih omrežij. V okviru doktorske disertacije sodita v njegov ožji interes raziskovanja:

- uporaba omrežnega kodiranja na brezžičnih usmerjevalnikih v brezžičnih zankastih omrežjih,
- dinamično proaktivno usmerjanje UDP prometa za preprečevanje zasičenja z zavedanjem in upoštevanjem lastnosti omrežnega kodiranja v brezžičnih zankastih omrežjih.