



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



mr Dragana Perić

METODE ZA ZAŠTITU SAOBRAĆAJA U IP RADIO MREŽAMA REALIZOVANIM IZNAD 70 GHz

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2011



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска документација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторски рад
Аутор, АУ:	Мр Драгана Перић, дипл. инж.
Ментор, МН:	проф. др Мирослав Поповић
Наслов рада, НР:	Методe за заштиту саобраћаја у IP радио мрежама изнад 70 GHz
Језик публикације, ЈП:	српски / латиница
Језик извода, ЈИ:	српски
Земља публиковања, ЗП:	Република Србија
Уже географско подручје, УГП:	Војводина
Година, ГО:	2010.
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	Нови Сад, трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	8 поглавља / 104 стране / 73 цитата / 5 табела / 29 слика
Научна област, НО:	Електротехника и рачунарство
Научна дисциплина, НД:	Рачунарске комуникације
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	радио-релејне везе изнад 70 GHz, мреже, заштита саобраћаја, рутирање, киша
УДК	
Чува се, ЧУ:	У библиотеци Факултета техничких наука, Нови Сад
Важна напомена, ВН:	
Извод, ИЗ:	Ова докторска дисертација се бави истраживањем у области преноса у IP радио мрежама реализованим у фреквенцијским опсезима изнад 70 GHz. У тези се предлажу нове методе за заштиту саобраћаја. Циљ тезе је дефинисање основе за оцену перформанси, описан је математички модел мреже и дефинисана су три критеријума за оцену перформанси. Основни допринос дисертације је садржан у дефинисању модела IP радио мрежа реализованих у фреквенцијским опсезима изнад 70 GHz, критеријума за оцену квалитета решења, као и предлогу оригиналних метода за заштиту саобраћаја који користе унапред израчунате заштитне путање.
Датум прихватања теме, ДП:	3.3.2011.
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник: Др. Александра Смиљанић, ванредни проф. Члан: Др. Бранислав Тодоровић, в.н.с. и ванр. проф. Члан: Др. Милан Шуњеварић, в.н.с. и ред. проф. Члан: Др. Драган Самарџија, доцент Члан, ментор: Др. Мирослав Поповић, редовни проф.
	Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :			
Identification number, INO :			
Document type, DT :	Monographic publication		
Type of record, TR :	Textual printed material		
Contents code, CC :	PhD Thesis		
Author, AU :	Dragana Peric, MSc		
Mentor, MN :	Miroslav Popovic, PhD		
Title, TI :	Traffic Protection Method in IP Radio Network above 70 GHz		
Language of text, LT :	Serbian		
Language of abstract, LA :	Serbian		
Country of publication, CP :	Republic of Serbia		
Locality of publication, LP :	Vojvodina		
Publication year, PY :	2011		
Publisher, PB :	Author's reprint		
Publication place, PP :	Novi Sad, Dositeja Obradovica sq. 6		
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	8 chapters / 104 pages / 73 references / 5 tables / 29 pictures		
Scientific field, SF :	Electrical Engineering		
Scientific discipline, SD :	Computer Engineering, Computer Communications		
Subject/Key words, S/KW :	radio links above 70 GHz, networks, traffic protection, routing, rain		
UC			
Holding data, HD :	The Library of Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia		
Note, N :			
Abstract, AB :	The PhD thesis belongs to the research field of IP radio networks realized at frequency bands above 70 GHz, with rain attenuation as dominant propagation effect and cause of link outages. New traffic protection methods on the network basis are proposed in this thesis. The goal of this thesis is definition of performance evaluation methodology, mathematical model is described and three performance evaluation criteria are defined. The main contribution of the thesis is in model definition for IP radio networks realized at frequency bands above 70 GHz, performance evaluation criteria definition and proposition of new original methods for traffic protection based on backup routes.		
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	3.3.2011.		
Defended on, DE :			
Defended Board, DB :	President:	Др. Александра Смиљанић, ванредни проф.	
	Member:	Др. Бранислав Тодоровић, в.н.с. и ванр. проф.	
	Member:	Др. Милан Шуњеварић, в.н.с. и ред. проф.	
	Member:	Др. Драган Самарџија, доцент	
	Member, Mentor:	Др. Мирослав Поповић, редовни проф.	
		Menthor's sign	

Zahvalnica

Ova disertacija je nastala kao rezultat projekta tehnološkog razvoja br. TR-11038 "Linkovi u milimetarskim opsezima (60 GHz) ultravisokog kapaciteta 1Gbit/s" finansiranog od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj u periodu 2008-2010. Dalja istraživanja će biti realizovana u okviru projekta tehnološkog razvoja br. TR-32052 "Istraživanje i razvoj rešenja za poboljšanje performansi bežičnih komunikacionih sistema u mikrotalasnim i milimetarskom opsegu frekvencija" koje Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj finansira u periodu 2011-2015.

Eksperimentalna istraživanja i ispitivanje na test mreži u računarskom simulatoru vršena su u laboratoriji za digitalnu obradu signala IMTEL Komunikacije a. d., Beograd.

Zahvaljujem se dr Miroslavu Popoviću, dr Branislavu Todoroviću, dr Milanu Šunjevariću, dr Aleksandri Smiljanić i mr Miroslavu Periću, na saradnji i podršci tokom izrade disertacije.

Sadržaj

SPISAK SLIKA.....	4
SPISAK TABELA.....	6
LISTA SKRAĆENICA.....	7
LISTA PROMENJIVIH.....	9
REZIME	12
1. UVOD.....	15
1.1. Metode zaštite saobraćaja na nivou veze	16
1.2. Metode zaštite saobraćaja na nivou mreže.....	18
1.3. Identifikacija problema i predlog rešavanja.....	19
1.4. Struktura disertacije	19
2. KOMUNIKACIJA U IP MREŽI SA RADIO-RELEJNIM VEZAMA IZNAD 70GHZ.....	22
2.1. IP protokol.....	24
2.2. Protokoli usmeravanja.....	25
2.3. Reakcija protokola usmeravanja na promene stanja u mreži	28
2.4. Model radio-relejne veze na frekvencijskom opsegu iznad 70GHz	30

2.4.1.	Prostiranje signala na opsezima iznad 70GHz	31
2.4.2.	Adaptivni protok, modulacija i zaštitno kodovanje	34
2.4.3.	Modelovanje uticaja kiše.....	36
2.5.	Simulaciono okruženje OPNET i NS2.....	41
2.6.	Reakcija protokola usmeravanja na promene stanja veza izazvane kišom	41
2.7.	Primena rezervnih putanja.....	47
2.8.	Mogućnosti unapređenja	49
3.	MATEMATIČKI MODEL MREŽE I KRITERIJUMI ZA OCENU PERFORMANSI	51
3.1.	Matematički model mreže.....	51
3.2.	Kriterijum maksimizacije proporcionalno fer raspodeljenog kapaciteta veza u mreži.....	53
3.3.	Kriterijum opterećenja veza	54
3.4.	Kriterijum maksimalnog protoka dodeljenog pojedinačnom zahtevu	56
3.5.	Implementacija matematičkog modela	57
4.	PREDLOG METODA ZA ZAŠTITU SAOBRAĆAJA U MREŽI	60
4.1.	Opis predloženog novog protokola OSPF-BP	60
4.2.	Opis predloženog novog protokola OSPF-BN.....	62
4.3.	Referentni slučajevi.....	63
4.4.	Raspoređivanje saobraćaja između putanja	64
4.4.1.	Ravnomerno raspoređivanje saobraćaja.....	65
4.4.2.	Iterativno raspoređivanje saobraćaja.....	66
4.4.3.	Proporcionalno fer raspoređivanje saobraćaja	68
5.	ANALIZA PERFORMANSI NA TEST MREŽI	69
5.1.	Performanse prema kriterijumu proporcionalno fer raspodele kapaciteta veza u mreži.....	74

5.1.1. Rezultati dinamičke analize	75
5.1.2. Rezultati statističke analize	76
5.2. Performanse prema kriterijumu opterećenja veza.....	78
5.2.1. Rezultati dinamičke analize	79
5.2.2. Rezultati statističke analize	82
5.3. Performanse mreže prema kriterijumu maksimalnog protoka dodeljenog pojedinačnom zahtevu.....	86
5.3.1. Rezultati dinamičke analize	86
5.3.2. Rezultati statističke analize	87
6. DISKUSIJA	90
6.1. Rekapitulacija performansi mreže.....	90
6.2. Mogućnosti praktične realizacije	92
6.3. Procenti vremena u kome se mogu očekivati date performanse mreže	93
7. ZAKLJUČAK.....	95
8. LITERATURA	98

Spisak slika

Sl. 2-1.	OSI i TCP/IP modeli komunikacije	22
Sl. 2-2.	Primer topologije mreže.....	24
Sl. 2-3.	Blok šema usmerivača	25
Sl. 2-4.	Uspostavljanje susedstva	27
Sl. 2-5.	Blok šema radio-relejne veze	30
Sl. 2-6.	Apsorpcija kiseonika i vodene pare u funkciji frekvencije.....	32
Sl. 2-7.	Primer zavisnosti verovatnoće greške u prenosu od snage prijemnog signala za uređaj kapaciteta 1Gbit/s sa QPSK modulacijom sa i bez Reed- Solomonovog zaštitnog kodovanja.....	35
Sl. 2-8.	Tipovi kišnih ćelija: a)umerena kiša cilindrični model, b) jaka kiša eksponencijalni model, c) jaka kiša Gausovski model	40
Sl. 2-9.	Relativni broj uspešnih zahteva za odjekom dobijen simulacijom različitih protokola usmeravanja.	43
Sl. 2-10	Radarska slika kišnog događaja	46
Sl. 2-11	Modelovanje kišnog događaja pomerajućim kišnim ćelijama	46
Sl. 2-12	Performanse mreže za vreme kišnog događaja za različite protokole usmeravanja	47
Sl. 5-1.	Topologija mreže, pravac i smer kretanja kišne ćelije	69
Sl. 5-2.	Primer generisanja zaštitnih putanja za saobraćajnih zahtev između dva usmerivača (12 i 1)	70
Sl. 5-3.	Promene u mreži uzrokovane pomeranjem kišne ćelije	73
Sl. 5-4.	Dodeljeni protoci prema proporcionalno fer raspodeli u odustvu kišne ćelije	74

Sl. 5-5.	<i>CDF dodeljenih protoka prema proporcionalno fer raspodeli u odustvu kišne ćelije</i>	75
Sl. 5-6.	<i>Promena kriterijumske funkcije $F_{\max}$ pri kretanju kišne ćelije</i>	76
Sl. 5-7.	<i>CDF normalizovane funkcije $F_{\max}/F_{\max}^0$ za slučaj umerene kiše $R_{\max}=20\text{mm/h}$, $\rho=5\text{km}$</i>	77
Sl. 5-8.	<i>CDF normalizovane funkcije $F_{\max}/F_{\max}^0$ za slučaj jake kiše $R_{\max}=40\text{mm/h}$, $\rho=2.5\text{km}$</i>	77
Sl. 5-9.	<i>Promena parametra opterećenja mreže $L_{\max}$ pri kretanju kišne ćelije</i>	79
Sl. 5-10.	<i>Promena parametra opterećenja mreže L_{ave} pri kretanju kišne ćelije</i>	80
Sl. 5-11.	<i>CDF parametra opterećenja mreže $L_{\max}$ za slučaj jake kiše $R_{\max}=40\text{mm/h}$, $\rho=2.5\text{km}$</i>	82
Sl. 5-12.	<i>CDF parametra opterećenja mreže L_{ave} za slučaj jake kiše $R_{\max}=40\text{mm/h}$, $\rho=2.5\text{km}$</i>	83
Sl. 5-13.	<i>CDF parametra opterećenja mreže $L_{\max}$ za slučaj umerene kiše $R_{\max}=20\text{mm/h}$, $\rho=5\text{km}$</i>	84
Sl. 5-14.	<i>CDF parametra opterećenja mreže L_{ave} za slučaj umerene kiše $R_{\max}=20\text{mm/h}$, $\rho=5\text{km}$</i>	84
Sl. 5-15.	<i>Promena parametra maksimalnog protoka S_{ave} pri kretanju kišne ćelije</i>	87
Sl. 5-16.	<i>CDF parametra maksimalnog protoka S_{ave} za slučaj jake kiše $R_{\max}=40\text{mm/h}$, $\rho=2.5\text{km}$</i>	87
Sl. 5-17.	<i>CDF parametra maksimalnog protoka S_{ave} za slučaj umerene kiše $R_{\max}=20\text{mm/h}$, $\rho=5\text{km}$</i>	88

Spisak tabela

Tab. 1.	<i>Pretpostavljena inverzna proporcionalnost $R_{\max}$ i ρ</i>	71
Tab. 2.	<i>Parametri opterećenja mreže u odsustvu kiše</i>	78
Tab. 3.	<i>Pogoršanje parametara opterećenja veza u odnosu na performanse mreže u odsustvu kišne ćelije u 50% slučajeva slučajnog izbora lokacije kišne ćelije</i>	85
Tab. 4.	<i>Karakteristike mreže u odsustvu kišne ćelije</i>	86
Tab. 5.	<i>S_{ave} [Mbit/s] ostvaren na 50% lokacija kišne ćelije</i>	89

Lista skraćenica

BER	Bit Error Ratio
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CDF	Cumulative Distribution Function
CRC	Critical Rain Cell
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
DVB-S	Digital Video Broadcasting - Satellite
ECMP	Equal Cost Multipath
EIGRP	Enhanced Interior Gateway Routing Protocol
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
ERC	European Radio Communications Committee
ETSI	European Telecommunication Standard Institute
ICMP	Internet Control Message Protocol
IGRP	Interior Gateway Routing Protocol
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
LSA	Link State Advertisement
MPLS	Multiprotocol Label Switching
NOPHY	Non Physical layer
OSI	Open System Interchange
OSPF	Open Shortest Path First
OSPF-BN	Open Shortest Path First - Backup route Non physical
OSPF-BNI	Open Shortest Path First - Backup route Non physical Iterative load balancing

OSPF-BNF	Open Shortest Path First - Backup route Non physical proportional Fairness load balancing
OSPF-BP	Open Shortest Path First - Backup route Physical
OSPF-BPI	Open Shortest Path First - Backup route Physical Iterative load balancing
OSPF-BPF	Open Shortest Path First - Backup route Physical proportional Fairness load balancing
OSPF-C	Open Shortest Path First - Capacity change
OSPF-CI	Open Shortest Path First - Capacity change Iterative load balancing
OSPF-CF	Open Shortest Path First - Capacity change proportional Fairness load balancing
OSPF-E	Open Shortest Path First - Even load balancing
OSPF-F	Open Shortest Path First - proportional Fairness load balancing
PER	Packet Error Ratio
PHY	Physical layer
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RFC	Request For Comments
RIP	Routing Information Protocol
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SONET	Synchronous Optical Network
TCP/IP	Transport Control Protocol / Internet Protocol
WDM	Wavelength Division Multiplex

Lista promenjivih

a_{AP}	slabljenje usled apsorpcije kiseonika i vodene pare [dB]
a_F	slabljenje usled fedinga na trasi [dB]
a_{FM}	rezerva za feding [dB]
a_R	ukupno slabljenje usled kiše na jednoj radio-relejnoj deonici [dB]
a_P	slabljenje u slobodnom prostoru [dB]
$b(i,j,k)$	koeficijent raspoređivanja između čvorišta i,j , preko toka $x(i,j,k)$
B	matrica raspoređivanja saobraćaja između različitih tokova čiji su elementi $b(i,j,k)$
BER	verovatnoća greške u prenosu
B_{RF}	širina zauzetog radio-frekvencijskog opsega [Hz]
c	brzina svetlosti ($3 \cdot 10^8$ m/s)
$c(e)$	kapacitet veze [Gbit/s]
C	vektor kapaciteta veza čiji su elementi $c(e)$
$c^{CRC}(e)$	minimalni kapacitet veze pod uticajem kritične kišne ćelije [Gbit/s]
$\delta(i,j,k,e)$	indikator pripadnosti e -te veze putanji $r(i,j,k)$
D	vektor indikatora pripadnosti veza putanji $r(i,j,k)$, čiji su elementi $\delta(i,j,k,e)$
d	rastojanje od centra kišne ćelije [km]
E	broj veza u mreži
E_b/N_o	odnos energije po bitu E_b i spektralne gustine snage šuma N_o [dB]
f	frekvencija [GHz]
F	funkcija proporcionalno fer raspodele

$F_{\max}$	maksimizovana funkcija proporcionalne fer raspodele
$F_{\max}^0$	maksimizovana funkcija proporcionalne fer raspodele u odsustvu kiše
γ_R	podužno slabljenje usled kiše [dB/km]
G_{Rx}	dobitak prijemne antene [dBi]
G_{Tx}	dobitak predajne antene [dBi]
$h(i,j)$	intenzitet saobraćajnih zahteva između dva čvorišta i, j [Gbit/s]
H	matrica saobraćajnih zahteva, čiji su elementi $h(i,j)$
k	Boltzmanova konstanta ($1.38 \cdot 10^{-23}$ [m ² kg/ (s ² K)])
K, α	koeficijenti slabljenja kiše zavisni od frekvencije i polarizacije
K_{TP}	koeficijent povećavanja protoka
l	dužina veze [km]
$L_l(e)$	opterećenje e -te veze
L_l	vektor opterećenja veza čiji su elementi $L_l(e)$
$L(e)$	normalizovano opterećenje e -te veze [1/bit/s]
L	vektor normalizovanih opterećenja veza čiji su elementi $L(e)$ [1/bit/s]
L_{ave}	srednje normalizovano opterećenje veza [1/bit/s]
$L_{\max}$	maksimalno normalizovano opterećenje veza [1/bit/s]
$L_r(i,j,k)$	normalizovano opterećenje putanje $r(i,j,k)$ [1/bit/s]
m	spektralna efikasnost modulacionog postupka iskazana količnikom [bit/Hz]
N	broj čvorišta u mreži
NF	faktor šuma [dB]
N_{hello}	broj paketa najave u procesu uspostavljanja susedstva
$N_k(i,j)$	broj tokova koji opslužuju saobraćajni zahtev $h(i, j)$
$N_r(i,j)$	broj putanja između čvorova i, j koji imaju jednake cene
n_R	snaga prijemnog signala [dBm]
n_{R0}	snaga signala u prijemniku u odsustvu fedinga [dBm]
$n_{RT}(\text{BER})$	prag prijema za datu verovatnoću greške u prenosu [dBm]
p_{Tx}	izlazna snaga predajnika [dBm]
ρ	poluprečnik kišne ćelije [km]

ρ^{CRC}	poluprečnik kritične kišne ćelije [km]
$r(i,j,k)$	putanja koju protokol usmeravanja dodeljuje toku $x(i,j,k)$
R	tabela usmeravanja - matrica putanja čiji su elementi $r(i,j,k)$
$R_{0.01\%}$	vrednost kumulativne raspodele intenziteta kiše za 0.01% vremena neraspoloživosti [mm/h]
$R(d)$	intenzitet kiše na rastojanju d od centra kišne ćelije [mm/h]
R_{max}	maksimalni intenzitet kiše u centru kišne ćelije [mm/h]
$R_{\text{max}}^{\text{CRC}}$	maksimalni intenzitet kiše u centru kritične kišne ćelije [mm/h]
$S(m,n)$	protok koji se ostvaruje kada je samo saobraćajni zahtev $h(m,n)$ različit od nule [bit/s]
S_{ave}	srednja vrednost $S(m,n)$ po svim vrednostima m,n [bit/s]
T	apsolutna temperatura [K]
T_{ip}	perioda ponavljanja izračunavanja koeficijenata iterativnog algoritma [s]
T_{dead}	interval neaktivnosti u procesu uspostavljanja susedstva [s]
T_{hello}	interval najave u procesu uspostavljanja susedstva [s]
T_r	vreme reakcije protokola usmeravanja [s]
$x(i,j,k)$	k -ti tok za realizaciju saobraćajnog zahteva $h(i,j)$

Rezime

U ovoj disertaciji razmatrane su metode zaštite saobraćaja u IP (engl. *Internet Protocol*) radio mrežama koje su realizovane u frekvencijskim opsezima iznad 70GHz. Ove mreže namenjene su za brzi prenos IP saobraćaja (preko 1Gbit/s) i pogodne su za povezivanje čvorišta računarskih mreža u kojima se nalaze usmerivači (engl. *routers*) koji obavljaju komutaciju IP saobraćaja. Radio-relejne veze iznad 70GHz posebno su pogođene uticajem slabljenja usled kiše, koje može da izazove prekide trajanja od nekoliko sekundi do nekoliko minuta. Prilikom izbora metode zaštite mora se voditi računa da u kratkom vremenskom intervalu može doći do čestih promena stanja veza u mreži. Zbog toga, primena metode zaštite saobraćaja koja se zasniva na ponavljanju algoritma usmeravanja pri svakoj promeni stanja veza, može da izazove nestabilnosti u mreži i gubitak saobraćaja. Usled čestih promena stanja veza u mreži, ova metoda daje previše česte zahteve za ponovno izračunavanje putanja. Prethodna istraživanja su pokazala da najčešće korišćeni protokoli usmeravanja ne mogu dovoljno brzo da odreaguju na promene i da se vreme reakcije može ubrzati ukoliko se primene unapred izračunate rezervne putanje.

Analizirana je metoda zaštite saobraćaja preusmeravanjem na unapred izračunate rezervne putanje i predložena su dva nova algoritma za izračunavanje rezervnih putanja prilagođena opsegu iznad 70GHz. Prvi algoritam za izračunavanje rezervnih putanja formiran je sa idejom da se za svaki saobraćajni zahtev obezbedi putanja kroz mrežu u slučajevima kada kiša nije narušila povezanost grafa mreže. Pošto algoritam uzima u obzir efekte prostiranja signala u opsezima iznad 70GHz, ima oznaku PHY (engl. *PHYsical layer*). Drugi algoritam bazira se na ideji da svakom saobraćajnom zahtevu treba obezbediti dve putanje koje ne sadrže zajedničke veze. Pošto algoritam ne uzima u

obzir efekte prostiranja signala u opsezima iznad 70GHz, ima onaku NOPHY (engl. *NO*n *PHYS*ical layer). Na osnovu ovih algoritama za izračunavanje rezervnih putanja predložene su modifikacije standardnog OSPF (engl. *Open Shortest Path First*) protokola usmeravanja koje su označene kao OSPF-BP (engl. *OSPF Backup Physical layer*) i OSPF-BN (engl. *OSPF Backup Non physical layer*). Cilj ovih metoda je poboljšanje performansi mreže kada je intenzitet kiše takav da ne dolazi do prekidanja povezanosti grafa mreže.

Rezervne putanje se izračunavaju unapred, pre početka prenosa podataka. Podaci se prenose i po glavnoj i po rezervnoj putanji, a vrši se raspoređivanje saobraćaja (engl. *load balancing*) između ovih putanja. Predložen je iterativni algoritam koji periodično računa koeficijente raspoređivanja, pa se raspoređivanje usklađuje sa promenama opterećenja veza u mreži. Time je postignuto usklađivanje sa trenutnim promenama kapaciteta veza koje nastaju usled kiše, a izbegnute su nestabilnosti koje bi nastale usled preusmeravanja, tj. ponovnog izračunavanja putanja. Novi protokoli sa iterativnim raspoređivanjem su OSPF-BPI (engl. *OSPF-BP Iterative load balancing*) i OSPF-BNI (engl. *OSPF-BN Iterative load balancing*).

Rezultati novih protokola su upoređeni sa referentnim slučajevima: standardni OSPF koji vrši preusmeravanje saobraćaja pri promeni stanja veza i "idealni" protokol koji vrši preusmeravanje posle promene stanja i kapaciteta veza OSPF-C (engl. *OSPF Capacity change*). U prvom referentnom slučaju primenjeno je ravnomerno raspoređivanje saobraćaja da bi se predstavio donji granični slučaj kada bi se mreža realizovala sa opremom na kojoj nisu izvršene modifikacije, sa podrazumevanim vrednostima parametara OSPF-E (engl. *OSPF Even load balancing*). U drugom referentnom slučaju primenjeno je predloženo iterativno raspoređivanje saobraćaja OSPF-CI (engl. *OSPF-C Iterative load balancing*), jer ono daje bolje rezultate u odnosu na ravnomerno raspoređivanje, te predstavlja gornji granični slučaj.

Analiza performansi izvršena je definisanjem matematičkog modela IP radio mreže iznad 70GHz i definisanjem kriterijuma za ocenu performansi. Predložena su tri kriterijuma za ocenu performansi mreže: (a) maksimizacija proporcionalno fer

raspodeljenog kapaciteta veza, (b) opterećenje veza i (c) maksimalno ostvariv protok dodeljen pojedinačnom saobraćajnom zahtevu.

Uticaj kiše opisan je modelom pomerajuće kišne ćelije koji je preuzet iz literature. Izvršene su dve vrste analiza: dinamička i statistička. U dinamičkoj analizi se prati promena kriterijumske funkcije za ocenu performansi u vremenu, tj. odziv na pretpostavljenu pobudu u vidu pomerajuće kišne ćelije. U statističkoj analizi dato je statističko očekivanje kriterijumske funkcije za ocenu performansi kada pomerajuća kišna ćelija zauzima neko od mogućih stanja opisanog parametrima pomerajuće kišne ćelije.

Performanse protokola su upoređene prema sva tri predložena kriterijuma. U slučaju maksimizacije proporcionalno fer raspodeljenog kapaciteta veza, razmatrani su granični slučajevi protokola sa fer raspoređivanjem OSPF-BPF (engl. OSPF-BP *proportional Fairness load balancing*), OSPF-BNF (engl. OSPF-BN *proportional Fairness load balancing*), OSPF-F (engl. OSPF *proportional Fairness load balancing*) i OSPF-CF (engl. OSPF-C *proportional Fairness load balancing*). U slučajevima kriterijuma opterećenja veza i maksimalnog protoka dodeljenog pojedinačnom saobraćajnom zahtevu razmatrani su slučajevi primenjenog iterativnog raspoređivanja saobraćaja u protokolima sa rezervnim putanjama OSPF-BPI i OSPF-BNI, kao i u drugom referentnom slučaju OSPF-CI, dok je kao donja granica prikazan referentni slučaj standardnog OSPF sa ravnomernim raspoređivanjem OSPF-E .

Dobijeni rezultati pokazuju da se primenom novih protokola sa unapred izračunatim rezervnim putanjama OSPF-BP i OSPF-BN ostvaruju dobici u odnosu na referentni slučaj standardnog OSPF, a takođe i da se rezultati približavaju performansama "idealnog" OSPF-C. Na osnovu dobijenih rezultatata date su smernice za praktičnu realizaciju ovih metoda i njihovo kombinovanje u cilju dobijanja najboljih performansi mreže.

1. UVOD

U radu se razmatraju mreže kojima se prenosi saobraćaj Internet protokola IP (engl. *Internet Protocol*). Ovakve mreže su prvenstveno namenjene za povezivanje računarskih mreža, a trend razvoja pokazuje da sve telekomunikacione mreže teže rešenju u kome se svi servisi (prenos govora, podataka, video prenos...) realizuju u IP protokolu [ITU-T Y.1001], [Rappaport 02], [Newman 04]. Za komutaciju saobraćaja u ovakvim mrežama koriste se usmerivači (engl. *routers*) koji su smešteni u čvorištima mreže, koja se nalaze na različitim geografskim lokacijama. Usmerivači su međusobno povezani vezama čiji kapaciteti danas dostižu nekoliko Gbit/s. Upotreba radio-relejnih veza za povezivanje usmerivača je vrlo pogodno rešenje zbog brzine instalacije, kao i mogućnosti rekonfiguracije [Ivanek 89]. Glavni nedostatak radio-relejnih veza velikog kapaciteta, na nižim frekvencijskim opsezima tipično do 18GHz, je problem interferencije koji ograničava gustinu mreže u urbanim sredinama. Takođe, cena zakupa korišćenja radio-frekvencija na ovim frekvencijskim opsezima je relativno visoka.

Zahvaljujući izuzetno uskim snopovima antena u frekvencijskom opsegu iznad 70GHz [TS 102 524], [EN 302 217] minimiziran je problem interferencije i omogućeno je često ponavljanje istog radio kanala, što predstavlja prednost u gustim urbanim područjima. Takođe, opsezi dodeljeni jednoj vezi su širine nekoliko GHz [ECC Rec (05)07], te se mogu koristiti jednostavnije modulacije i arhitekture uređaja [Wells 06]. Dodatno, određene nacionalne administracije podstiču upotrebu ovog opsega niskom cenom zakupa [OfW 369], [FCC-05-45], te su ove veze postale vrlo konkurentne drugim načinima prenosa kao što su optički kabl i optička veza u slobodnom prostoru. Imajući u vidu sve navedene činjenice, upotreba frekvencijskog opsega iznad 70GHz je vrlo pogodna za realizaciju mreža.

Problem koji se javlja u primeni radio-relejnih veza iznad 70GHz jeste značajno slabljenje usled kiše, koje izaziva kratkotrajne prekide veze (u trajanju od nekoliko sekundi do nekoliko minuta). U slučaju veza velikog kapaciteta preko 1Gbit/s jasno je da prilikom prekida dolazi do značajnog gubitka saobraćaja, te je potrebno primeniti neku od tehnika zaštite saobraćaja. Razlikujemo dve grupe metoda zaštite saobraćaja: (a) na nivou jedne veze i (b) na nivou mreže.

1.1. Metode zaštite saobraćaja na nivou veze

Za radio-relejne veze, zaštita na nivou jedne veze postiže se smanjenjem praga prijema, čime se povećava rezerva za feding na trasi i poboljšavaju parametri kvaliteta i raspoloživosti veze.

U slučaju radio-relejnih veza iznad 70GHz, pragovi prijema pri prenosu 1Gbit/s su visoki, čak i za robusne modulacije i postupke kodovanja. Na primer, kod radio-relejnih uređaja koji koriste BPSK ili DBPSK modulaciju sa Reed Solomon zaštitnim kodovanjem, prag prijema iznosi tipično oko -60dBm [Xiong 00], [Lin 83]. Zbog toga su dometi ovakvih veza ograničeni na 3-5km na opsegu 70/80GHz. Ovaj rezultat je dobijen korišćenjem standardnog propagacijskog modela [ITU-R Rec.P.530-13] za neraspoloživost veze od 0.05%, uz pretpostavku klimatskih karakteristika koji odgovaraju teritoriji Srbije (ITU-R zona K) [ITU-R PN.837-1].

Tehnike adaptivnog protoka, adaptivne modulacije i adaptivnog zaštitnog kodovanja omogućavaju kompromis između protoka i otpornosti na slabljenje uzrokovano kišom, te su pogodne za primenu u radio-relejnim vezama iznad 70GHz. Budući da se IP protokol bazira na paketskoj komutaciji, implementacija ovih metoda je jednostavna, jer je za usklađivanje protoka dovoljno realizovati odgovarajuće redove čekanja.

Metoda adaptivnog protoka se bazira na činjenici da smanjenje protoka izaziva smanjenje potrebnog propusnog opsega signala, a samim tim i nivo šuma koji ulazi u prijemnik, te uz adekvatnu korekciju prijemnih filtara dovodi do smanjenja praga

prijema [Xiong 00]. Tipično se smanjenjem protoka 10 puta ostvaruje smanjenje praga prijema za oko 10dB, čime se značajno povećava margina za fading i povećava raspoloživost veze.

Upotreba adaptivne modulacije takođe može značajno da popravi performanse sistema. Osnovna ideja ove metode je da se pri malom slabljenju na trasi koristi najstroženija modulacija, a pri većem slabljenju manje složena modulacija kod koje je zahtevani prag prijema za istu verovatnoću greške u prenosu manji. Na primer, promena sa 16QAM modulacije na QPSK modulaciju na račun smanjenja kapaciteta veze dva puta smanjuje se i prag prijema za 3dB, što je detaljnije opisano u literaturi [Xiong 00].

Upotreba zaštitnog kodovanja [Lin 83] je praktično obavezna u svim sistemima bežične komunikacije [Goldsmith 05]. Cilj zaštitnog kodovanja u sistemima u frekvencijskim opsezima iznad 70GHz je približavanje prenosu bez greške (engl. *QeF - Quasi Error Free*). Jedna od mogućih realizacija je upotreba dvostrukog kodovanja sa istovremenom upotrebom spoljašnjeg koda (engl. *outer code*) i unutrašnjeg koda (engl. *inner code*). Kao spoljašnji kodovi koriste se konvolucionni kodovi sa Viterbijevim dekodovanjem koji smanjuju prag prijema za veliku verovatnoću greške (tipično oko 10^{-4}). Kao unutrašnji kodovi koriste se blok kodovi koji sa velikom verovatnoćom greške (tipično oko 10^{-4}) smanjuju verovatnoću greške na QeF (tipično manje od 10^{-12}). Metoda združenog konvolucionog i blok kodovanja je našla veliku primenu u prenosu komprimovanog digitalizovanog TV signala [DVB-S], [Cioni 03], a takođe se može primeniti u vezama u frekvencijskim opsezima iznad 70GHz.

Primena metoda zaštite saobraćaja na nivou jedne veze omogućava povećanje raspoloživosti saobraćaja do oko 99.99% vremena za dužine deonice do 8km na klimatskom području Srbije, računato prema standardnom propagacijskom modelu [ITU-R Rec.P.530-13]. Međutim za ostvarenje većeg stepena raspoloživosti, a posebno za poboljšanje kvaliteta prenosa (povećanja maksimalnog protoka dodeljenog saobraćajnom zahtevu) potrebno je primeniti tehnike zaštite saobraćaja na nivou mreže.

1.2. Metode zaštite saobraćaja na nivou mreže

U slučaju veza na frekvencijskim opsezima iznad 18GHz, gde slabljenje usled kiše predstavlja najznačajniji propagacijski uzrok neraspoloživosti veze, a posebno na frekvencijskim opsezima iznad 70GHz gde je praktično i jedini, u literaturi [ITU-R Rec. P.530-13], [ITU-R Rec. F.1704] kao metoda zaštite saobraćaja na nivou mreže preporučuje se upotreba zaštitne putanje (engl. *path diversity*). Ova metoda se bazira na činjenici da korelisanost intenziteta kiše između dve tačke u prostoru eksponencijalno opada sa njihovim rastojanjem, što je i eksperimentalno potvrđeno u višegodišnjim merenjima [Feldhake 02], [Cheffena 09], [Hirata 09]. U ovoj disertaciji je usvojen pristup koji polazi od mehanizma nastanka i kretanja kiše, na osnovu koga je formiran model sa dvodimenzionalnom raspodelom kiše koja se menja u toku vremena [Bonati 99]. Na osnovu ovog pristupa je analiziran uticaj kiše na performanse mreže i efikasnost metoda zaštite saobraćaja.

Takođe, obzirom da se koristi IP saobraćaj, usmerivači koji se nalaze u čvorištima mreže preusmeravaju saobraćaj ka različitim putanjama i obavljaju komutaciju. Kada se neka od veza u mreži prekine, usmerivači će detektovati prekid, preračunati nove putanje kroz mrežu i preusmeriti saobraćaj [Retana 99]. Na taj način se ostvaruje efikasna zaštita IP saobraćaja. Međutim, kako je za uspostavljanje novih putanja potrebno određeno vreme, u slučaju čestih promena stanja i kapaciteta veza u mreži može doći do nestabilnosti mreže i značajnog gubitka saobraćaja. Rezultati dobijeni na osnovu simulacije test mreže u kojoj se kao metoda zaštite koristi preusmeravanje saobraćaja, za niže frekvencijske opsege (23GHz, 38GHz), prikazani su u radu [Peric IST 05]. U literaturi [Jabbar 08] dat je predlog za prevazilaženje ovog problema korekcijom algoritma preusmeravanja saobraćaja koji koristi meteorološku radarsku sliku. Nedostatak ovog pristupa je potreba za značajnom interakcijom između fizičkog i mrežnog sloja komunikacije (engl. *cross layer*). [ITU-T X.210], kao i za dodatnom opremom za komunikaciju usmerivača i meteoroloških radara.

1.3. Identifikacija problema i predlog rešavanja

U ovoj disertaciji predstavljene su metode zaštite saobraćaja sa unapred izračunatim rezervnim putanjama i algoritmima za preusmeravanje celokupnog ili dela saobraćaja preko njih. U [Peric IEEE CL 10] se opisuju dva nova načina izračunavanja rezervnih putanja PHY (engl. *PHYsical layer*) i NOPHY (engl. *NO*n *PHYsical layer*) i pokazane su njihove performanse na test mreži primenom kriterijuma maksimizacije proporcionalno fer raspodeljenog kapaciteta veza [Pioro 04]. U okviru disertacije, na osnovu ovih algoritama definisane su modifikacije OSPF (engl. *Open Shortest Path First*) protokola usmeravanja: OSPF-BP (engl. *OSPF Backup Physical layer*) i OSPF-BN (engl. *OSPF Backup Non physical layer*). Performanse datih protokola usmeravanja dodatno su analizirane i u pogledu opterećenja mreže i maksimalnog ostvarivog kapaciteta između čvorišta i date su napomene u vezi mogućnosti njihove praktične realizacije.

1.4. Struktura disertacije

Ova disertacija je organizovana u osam poglavlja.

U prvom uvodnom poglavlju dati su obrazloženje i struktura teme i pregled osnovne literature vezane za ovu temu.

U drugom poglavlju opisana je komunikacija u IP mreži sa radio-relejnim vezama iznad 70GHz. Date su osnovne karakteristike IP protokola i protokola usmeravanja, kao i opisana je reakcija ovih protokola na promene stanja veza u mreži. Formulisan je model veze na frekvencijskom opsegu iznad 70GHz i model slabljenja usled kiše. Opisana je analiza izvršena u standardnim simulacionim okruženjima OPNET [Opnet] i NS2 [Ns2]. Navedeni su rezultati prethodnih istraživanja vezanih za reakciju algoritama usmeravanja na promene stanja veza izazvanih kišom za niže frekvencijske opsege (23GHz i 38GHz). Dat je pregled literature u kojoj se razmatra ideja rezervne putanje i

objašnjene su specifičnosti primene ovog metoda zaštite u radio-relejnim vezama iznad 70GHz.

U trećem poglavlju opisan je matematički model mreže. Definisana su tri kriterijuma za ocenu performansi mreže: maksimizacija proporcionalno fer raspodeljenog kapaciteta veza u mreži, opterećenje veza i maksimalan protok dodeljen pojedinačnom saobraćajnom zahtevu. Date su napomene u vezi implementacije matematičkog modela.

U četvrtom poglavlju su definisana dva nova algoritma za definisanje zaštitnih putanja NOPHY i PHY. Na osnovu ovih algoritama, definisane su modifikacije OSPF protokola usmeravanja: OSPF-BP i OSPF-BN. Opisan je nov iterativni algoritam za raspoređivanje saobraćaja u kome se koeficijenti raspoređivanja periodično usklađuju sa opterećenjem putanja, pa su novi protokoli u kojima je primenjeno iterativno raspoređivanje nazvani OSPF-BPI (engl. *OSPF-BP Iterative load balancing*) i OSPF-BNI (engl. *OSPF-BN Iterative load balancing*). Opisano je i ravnomerno raspoređivanje koje je najjednostavnije za implementaciju. Definisani su referentni slučajevi sa kojima se porede performanse novih protokola. Prvi referentni slučaj je OSPF-E (engl. *OSPF Even load balancing*) predstavlja granični slučaj kada bi se mreža realizovala sa opremom na kojoj nisu izvršene modifikacije, sa podrazumevanim vrednostima parametara OSPF protokola [RFC 2328] i ravnomernim raspoređivanjem. Drugi referentni slučaj je OSPF-CI (engl. *OSPF-C Iterative load balancing*) koji je "idealni" protokol u kome se preusmeravanje vrši nakon svake promene kapaciteta veze, pri čemu je cena usklađena sa trenutnim kapacitetom veze i vrši se iterativno raspoređivanje. Takođe je opisano i fer raspoređivanje koje predstavlja granični slučaj raspoređivanja saobraćaja koji se razmatra u analizi performansi mreže prema kriterijumu maksimizacije proporcionalno fer raspodeljenog kapaciteta veza OSPF-BPF (engl. *OSPF-BP proportional Fairness load balancing*), OSPF.BNF (engl. *OSPF-BP proportional Fairness load balancing*), OSPF-F (engl. *OSPF-BP proportional Fairness load balancing*) i OSPF-CF (engl. *OSPF-BP proportional Fairness load balancing*).

U petom poglavlju predstavljena je analiza performansi izvršena na predloženoj test mreži. Najpre je opisana test mreža i dati su njeni osnovni parametri koji se koriste u analizi. Izvršene su dve vrste analiza: dinamička i statistička. Dinamička analiza kao rezultat daje promenu kriterijumske funkcije ocene performansi u vremenu, za pretpostavljen pravac, smer i brzinu kretanja kišne ćelije. Statistička analiza daje statističko očekivanje kriterijumske funkcije za ocenu performansi kada pomerajuća kišna ćelija zauzima neko od mogućih stanja opisanog parametrima pomerajuće kišne ćelije.

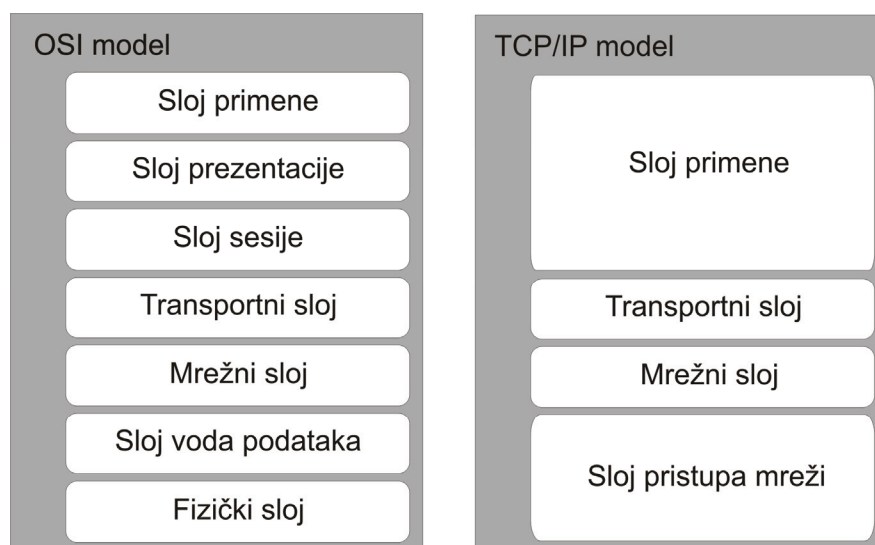
U šestom poglavlju data je diskusija dobijenih rezultata kroz rekapitulaciju performansi mreže. Prikazane su mogućnosti praktične realizacije. Navedeni su pravci daljih istraživanja vezanih za proračun procenta vremena u kome se mogu očekivati date performanse mreže.

U sedmom poglavlju su sumirani najvažniji zaključci.

U osmom poglavlju dat je pregled korišćene literature.

2. KOMUNIKACIJA U IP MREŽI SA RADIO-RELEJNIM VEZAMA IZNAD 70GHz

Za opisivanje komunikacije između korisnika u IP mreži koristi se TCP/IP model (engl. *Transport Control Protocol / Internet Protocol*) [RFC 1122], koji je sličan OSI modelu povezivanja (engl. *Open System Interconnection*) [ITU-T X.210]. U TCP/IP modelu sloj primene (engl. *application layer*) objedinjuje tri sloja OSI modela: sloj primene (engl. *application layer*), sloj prezentacije (engl. *presentation layer*) i sloj sesije (engl. *session layer*). Oba modela imaju transporni sloj (engl. *transport layer*) i mrežni sloj (engl. *network layer*). U TCP/IP modelu sloj pristupa (engl. *network access layer*) objedinjuje dva sloja OSI modela: sloj voda podataka (engl. *data link layer*) i fizički sloj (engl. *physical layer*). Struktura TCP/IP i OSI modela prikazane su na Sl. 2-1.



Sl. 2-1. OSI i TCP/IP modeli komunikacije

Na najvišem sloju modela (u slučaju OSI modela to je sloj primene) određuje se struktura poruke prilagođena krajnjem korisniku. Takođe, na ovom sloju se, prema

zahtevima korisnika, određuju i potrebni parametri kvaliteta prenosa. Na svakom od sledećih nižih slojeva vrši se dodatna obrada poruke (podela na manje delove i dodavanje zaglavlja).

Na transportnom sloju poruka se deli na segmente (engl. *segments*) koji se prosleđuju mrežnom sloju. U slučaju da je neki od segmenata oštećen pri prenosu kroz mrežu, na transportnom sloju se može zahtevati ponovni prenos poruke. Na taj način višim slojevima je zagarantovan prenos bez greške.

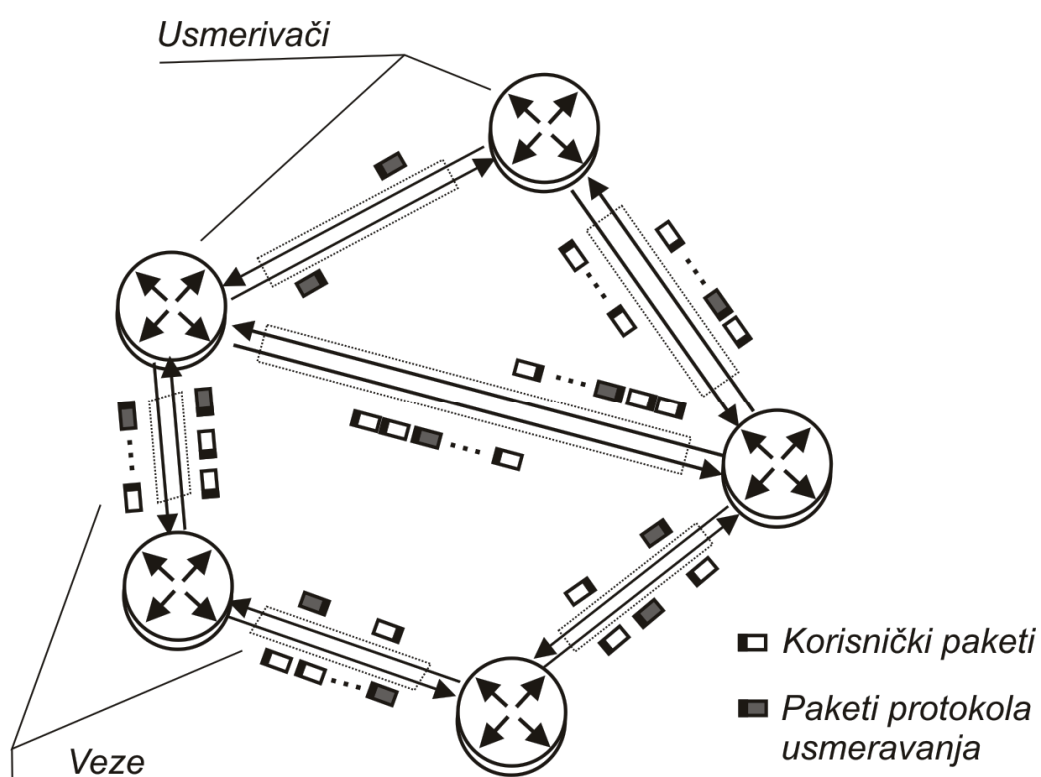
Na mrežnom sloju segmenti transportnog sloja dele se na pakete. Prenos paketa na mrežnom sloju obavlja se od njihovog izvora do odredišta na najbolji mogući način (engl. *best effort*), što znači da se ne garantuje uspešnost prenosa paketa. Sa stanovišta mrežnog sloja, mreža se sastoji od usmerivača paketa međusobno povezanih vezama.

Na nivou jedne veze u OSI modelu razlikuju se dva sloja: sloj voda podataka i fizički sloj. Na sloju voda podataka paketi se dele na okvire (engl. *frames*) sastavljene od skupova bita koji se prenose kroz medijum na fizičkom sloju. Za prenos se koriste postupci modulacije koji su prilagođeni vrsti prenosnog medijuma. Greške u prenosu mogu da oštete okvir, odnosno paket koji se u njemu prenosi, tako da dolazi do gubitka paketa. Pored grešaka u prenosu, gubitak paketa nastaje i u slučaju popunjenih redova čekanja (engl. *congestion*). Posledice oba razloga za gubitak paketa se ispravljaju na transportnom sloju. U TCP/IP modelu dva najniža sloja objedinjena su u sloju pristupa mreži.

U ovoj disertaciji razmatran je Internet protokol kao protokol mrežnog sloja i mreža sastavljena od radio-relejnih veza. Prenosni medijum je radio-relejna veza i na njoj se obavljaju funkcije protokola sloja voda podataka i fizičkog sloja, te će u ovom poglavlju biti detaljnije razmotreni.

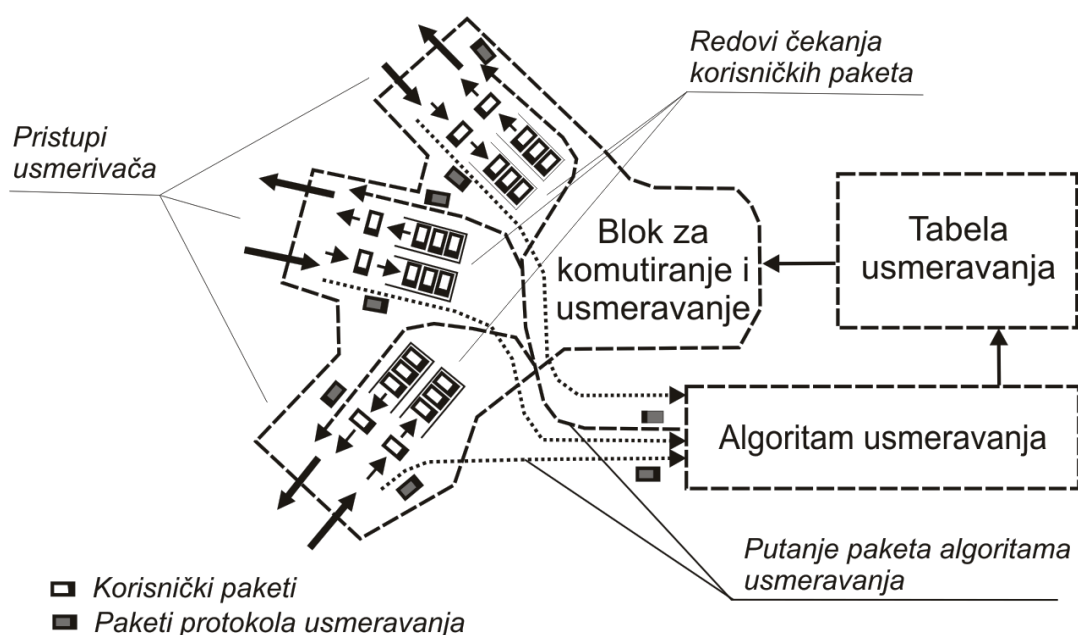
2.1. IP protokol

IP protokol je protokol mrežnog sloja TCP/IP [RFC 1122] i OSI modela [RFC 791], koji omogućava usmeravanje saobraćaja između različitih čvorišta mreže za komutaciju paketa. Prema specifikaciji IP protokola, ne zahteva se potvrda uspostavljanja veze, niti se proverava da li su podaci stigli na svoje odredište. Ove funkcije su ostvarene protokolima viših slojeva [ITU-T X.210].



Sl. 2-2. Primer topologije mreže

Primer strukture mreže dat je na Sl. 2-2. Mreža se sastoji od usmerivača (engl. *router*) koji su međusobno povezani jednosmernim vezama (engl. *link*). Na taj način jasno identifikujemo dolazne i odlazne veze usmerivača. U praksi se dve jednosmerne veze između dva čvorišta obično realizuju kao jedna dvosmerna veza.



Sl. 2-3. Blok šema usmerivača

Osnovni blokovi usmerivača, prikazani na Sl. 2-3., su pristupi (engl. *port*) na kojima se završavaju veze, blok za usmeravanje paketa i tabela usmeravanja (engl. *routing table*). Svaki od pristupa u sebi sadrži red čekanja za pakete u kome se vrši izravnjavanje protoka dolaznih i odlaznih pristupa. Na osnovu određene adrese paketa iz tabele usmeravanja određuje se odlazni pristup na koji treba preusmeriti dati paket. Tabela usmeravanja se popunjava podacima koji se obezbeđuju prema protokolima usmeravanja (engl. *routing protocol*), koji su detaljnije opisani u daljem tekstu.

2.2. Protokoli usmeravanja

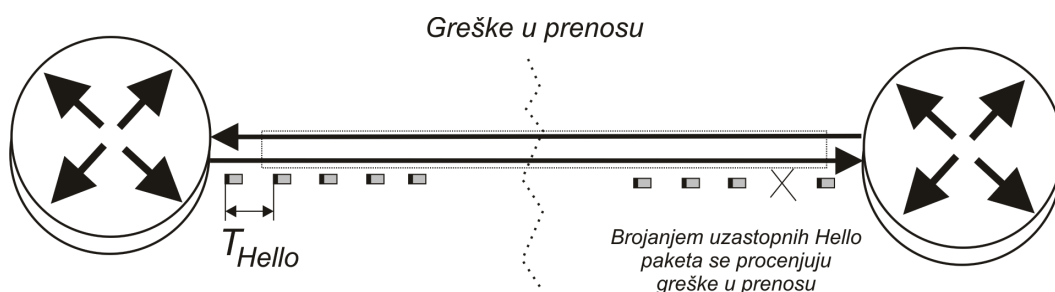
Cilj protokola usmeravanja je da odredi putanju koja je, prema zadatom kriterijumu odlučivanja, bolja u odnosu na druge putanje u mreži. Za definisanje kriterijuma odlučivanja koriste se funkcije metrike, kojima se dodeljuje mera kvaliteta pojedinačne veze, odnosno deonice (engl. *hop*). Metrike imaju prirodu aditivnosti što znači da se metrika jedne putanje dobija sabiranjem metrika svih deonica koje čine tu putanju. Različiti protokoli usmeravanja koriste različite funkcije metrike, na primer broj deonica u putanji, kombinacija kapaciteta veze, opterećenja, kašnjenja i pouzdanosti.

Prema načinu formiranja i osvežavanja tabele usmeravanja, protokoli usmeravanja se mogu podeliti na protokole usmeravanja na osnovu vektora udaljenosti (engl. *distance vector routing protocols*) i protokole rutiranja na osnovu stanja veza (engl. *link state routing protocols*).

Protokoli usmeravanja na osnovu vektora udaljenosti određuju udaljenost (broj deonica) i pravac (pristup) prema svakom odredišnom čvorištu u mreži. Ovi podaci se upisuju u tabelu usmeravanja svakog usmerivača. Funkcija metrike je udaljenost, tj. broj deonica između usmerivača. Usmerivači koji koriste protokol usmeravanja na osnovu vektora udaljenosti, periodično šalju susednim usmerivačima poruku osvežavanja koja sadrži celu ili delimičnu tabelu usmeravanja. Slanje tabele usmeravanja se ponavlja i kada nije došlo do promene u mreži. Prijemom poruke osvežavanja, usmerivač može proveriti sve poznate putanje i upisati promene u tabelu usmeravanja. Primeri protokola usmeravanja na osnovu vektora udaljenosti su: RIP (engl. *Routing Information Protocol*) [RFC 1058] i IGRP (engl. *Interior Gateway Routing Protocol*) [Retana 99]. Periode osvežavanja se razlikuju u zavisnosti od primenjenog protokola usmeravanja i mogu se podesiti zadavanjem komande administratora mreže. Podrazumevane vrednosti su 30s za RIP, odnosno 90s za IGRP. Mana ovog načina osvežavanja tabela usmeravanja je što se čestim slanjem poruka osvežavanja smanjuje efektivni kapacitet veza za prenos korisničkih paketa.

U slučaju protokola na osnovu stanja veza, prikupljaju se informacije o stanju veza koje se završavaju na pristupima usmerivača. Ovaj postupak se naziva uspostavljanje susedstva. Usmerivač će pokušati da postane susedni najmanje jednom od usmerivača sa kojima je povezan. Na početku postupka uspostavljanja susedstva, usmerivač šalje pakete najave (engl. *hello packet*) na svoje odlazne pristupe i od susednog usmerivača očekuje odgovor. Paketi se šalju uzastopno sa intervalom najave koji se označava sa T_{hello} . Posle uspešnog prijema N_{hello} broja paketa najave, smatra se da je uspostavljeno stanje susedstva i da veza između dva usmerivača uspešno funkcioniše. U tabelu usmeravanja se upisuje ova putanja koja ima posebno značenje i naziva se putanjom direktno povezanih usmerivača (engl. *connected route*). U slučaju da usled grešaka u

prenosu ili prekida veze izostane prijem paketa posle T_{dead} vremena od prijema poslednjeg paketa smatra se da veza više ne funkcioniše i odgovarajuća putanja direktno povezanih usmerivača se briše iz tabele usmeravanja. Vrednost intervala neaktivnosti T_{dead} je celobrojni umnožak vrednosti intervala najave T_{hello} . Parametri T_{hello} , N_{hello} i T_{dead} se mogu konfigurisati od strane administratora mreže sa odgovarajućim minimalnim korakom koji kod većine protokola usmeravanja iznosi 1s. Primer protokola usmeravanja na osnovu stanja veza je OSPF (engl. *Open Shortest Path Protocol*) [RFC 2328], a podrazumevane vrednosti parametara su: T_{hello} iznosi 10s, N_{hello} iznosi 4, a T_{dead} iznosi 40s.



Sl. 2-4. Uspostavljanje susedstva

U sledećem koraku se formira tabela usmeravanja ka drugim usmerivačima koji nisu povezani direktnim vezama, već se prenos paketa vrši preko više deonica. Informacije o stanju pojedinačnih veza se dobijaju na osnovu posebnih paketa za oglašavanje stanja veza LSA (engl. *Link State Advertisement*). Ovi paketi se emituju tzv. mehanizmom plavljenja (engl. *flooding*), što znači da se prosleđuju ka svim pristupima u usmerivaču, čime se osigurava njihova distribucija do svih usmerivača u mreži. LSA paketi se emituju kada se detektuje promena stanja veze. U cilju povećanja pouzdanosti, pored poruka izazvanih promenom stanja veze (engl. *triggered LSA*) emituju se i periodične poruke osveženja u dužim vremenskim razmacima npr. 30 minuta. Po prijemu LSA paketa svaki usmerivač započinje preračunavanje prema algoritmu najkraće putanje i formira tabelu usmeravanja.

Algoritmi za formiranje tabele usmeravanja su realizovani po principu najkraće putanje (u smislu najmanje metrike putanje). Algoritam za formiranje tabele

usmeravanja se izvršava na svakom od usmerivača i rezultat koji se dobija je jednoznačan.

Takođe postoje kombinacije protokola na osnovu stanja veze i protokola na osnovu vektora udaljenosti. Jedan od primera je EIGRP (engl. *Enhanced Interior Gateway Routing Protocol*) [Retana 99], [Garcia 93] koji na osnovu razmene paketa najave detektuje stanja veza povezanih na usmerivač, a zatim periodično razmenjuje tabele usmeravanja. Kod ovog protokola podrazumevane vrednosti su T_{hello} iznosi 5s, N_{hello} iznosi 3, a T_{dead} iznosi 15s. Napomenimo da ovaj protokol pod određenim uslovima omogućava primenu zaštitne putanje što će biti opisano u daljem tekstu.

2.3. Reakcija protokola usmeravanja na promene stanja u mreži

Promene stanja u mreži su: promene stanja veza (raspoloživa/neraspoloživa) i promene kapaciteta veza, nastale kao posledica slabljenja na radio-relejnoj vezi. U širem smislu, u promene stanja u mreži spadaju i promene topologije mreže, dodavanje novih usmerivača, ukidanje postojećih veza, dodavanje novih veza i sl. Budući da se ove druge vrste promena retko javlju neće biti razmatrane u ovom radu.

Na osnovu primljenih paketa osvežavanja vrši se usklađivanje tabele usmeravanja sa nastalom promenom u mreži. Paketi koji se usmeravaju za vreme ovog procesa se gube, a posledice gubitka paketa zavise od tipa aplikacije [ITU-T Y.1541].

Kod protokola usmeravanja na osnovu vektora udaljenosti, usmerivači periodično razmenjuju cele tabele usmeravanja. Zbog velike količine podataka koji se prenosi, period razmenjivanja tabele usmeravanja je veliki, te se promene stanja veze detektuju sa zakašnjenjem.

Kod protokola usmeravanja na osnovu stanja veza, izbor parametara T_{hello} , N_{hello} i T_{dead} direktno utiče na efikasnost procesa usklađivanja tabele usmeravanja sa promenom

u mreži. Smanjivanjem vrednosti ovih parametara postiže se brža reakcija na promene, čime se sprečava gubitak paketa. S druge strane, pojava kratkotrajnih grešaka u prenosu se u slučaju suviše malih vrednosti može proglasiti za nerazpoloživost veze.

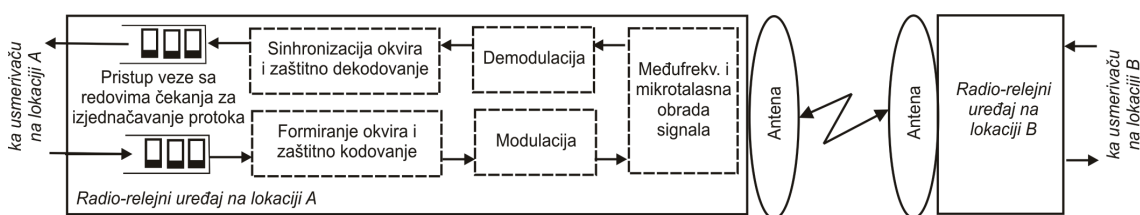
Procesi slanja LSA paketa i osvežavanja tabela usmeravanja odvijaju se na različitim usmerivačima nezavisno. Na taj način, nove tabele usmeravanja usklađene sa promenama u mreži se ne dobijaju istovremeno na svim usmerivačima, što može dovesti do pogrešnog usmeravanja paketa i u određenim slučajevima do pojave petlji u usmeravanju. Iako se takvi paketi zahvaljujući mehanizmu zastarevanja paketa (engl. *time-to-live*) na kraju odbacuju [Retana 99], pored gubitaka paketa smanjuje se i kapacitet veze. Proces od vremena detekcije promene u mreži do usklađivanja tabela usmeravanja svih usmerivača sa tom promenom naziva se konvergencija mreže.

Primenom metode zaštitnih putanja (engl. *backup routes*) preko kojih se preusmerava saobraćaj u slučaju detekcije neispravnosti glavne putanje smanjuje se vreme potrebno za preračunavanje najkraćih putanja i konvergenciju mreže, jer se lokalno obavlja na jednom usmerivaču. Ipak, za uspešnost ove metode bitna je pravovremena detekcija promena stanja veza.

Metoda zaštitnih putanja je primenjena u EIGRP protokolu usmeravanja [Garcia 93]. U slučaju prekida jedne veze na putanji koja je direktno povezana na usmerivač vrši se preusmeravanje paketa na drugu vezu kojom počinje zaštitna putanja. Da bi se izbegle petlje u usmeravanju uvedeno je ograničenje da metrika ostatka zaštitne putanje (od susednog usmerivača do odredišta) mora biti manja od metrike glavne putanje. Pošto ovaj uslov nije uvek moguće zadovoljiti, za neke saobraćajne zahteve nije moguće odrediti zaštitne putanje prema ovom algoritmu. Imajući u vidu navedena ograničenja mehanizam zaštitne putanje je u potpunosti primenjiv samo u slučajevima mreža kad su putanje paketa definisane unapred u celosti od izvora do krajnjeg odredišta paketa.

2.4. Model radio-relejne veze na frekvencijskom opsegu iznad 70GHz

Radio-relejna veza obuhvata komunikaciju na sloju voda podataka i fizičkom sloju. Radio-relejna veza koja povezuje lokaciju A i lokaciju B se sastoji iz dva radio-relejna uređaja koji su instalirani na svakoj od njih, što je prikazani na Sl. 2-5. Radio-relejna veza obuhvata dve jednosmerne veze u smeru od A ka B i u suprotnom smeru.



Sl. 2-5. Blok šema radio-relejne veze

Usmerivač i radio relejni uređaj su povezani preko pristupa koji po pravilu ima veći kapacitet nego što je kapacitet radio-relejne veze (npr. kapacitet pristupa je 1Gbit/s a radio-relejna veza ima promenljiv kapacitet od 1Gbit/s, 100Mbit/s ili 10Mbit/s). Zbog toga je neophodno izvršiti izjednačavanje protoka između pristupa i protoka radio-relejne veze. Ova funkcija obavlja se primenom redova čekanja po FIFO principu (engl. *First In First Out*) kod kojih je takt upisa jednak taktu pristupa a takt čitanja jednak taktu radio-relejne veze. Pretpostavljeno je da je kapacitet ovih redova čekanja dovoljno veliki da zbog njega ne dolazi do preopterećenja. U bloku multipleksa IP paketima se dodaju zaglavlja, biti službene komunikacije i biti zaštitnog kodovanja, što zajedno predstavlja radio okvir (engl. *radio frame*). Biti službene komunikacije omogućavaju nadgledanje funkcionisanja cele veze i konfigurisanje adaptivnog protoka, modulacije i zaštitnog kodovanja. Biti radio okvira se u modulatoru prevode u modulacione simbole [Xiong 00]. Modulacioni simboli se dalje u bloku predajne međufrekvencijske i mikrotalasne obrade transliraju na predajnu radio-frekvenciju [Ivanek 89] i zatim se preko antene šalju ka radio-relejnem uređaju na drugoj lokaciji. Prijemna antena prima signal i u blokovima prijemne mikrotalasne i međufrekvencijske obrade dovodi na međufrekvenciju pogodnu za demodulaciju. U demodulatoru se dekoduju prijemni simboli i prosleđuju demultipleksu koji obavlja postupak zaštitnog dekodovanja,

izdvajanja službenih bita i rekonstrukcije IP paketa. IP paket se dalje preko prijemnog reda čekanja prosleđuje ka usmerivaču. U slučaju neuspešne rekonstrukcije dolazi do gubitka paketa. Na isti način realizovana je i veza u suprotnom smeru. Jedna praktična realizacija obrade signala u radio-relejnem uređaju detaljno je opisana u [Perić ETRAN 08].

Sa stanovišta mrežnog sloja komunikacije radio-relejna veza predstavlja spojni put koji ima odgovarajući kapacitet, kašnjenje i verovatnoću gubitka paketa. U daljem tekstu pokazano je da se radio-relejna veza u frekvencijskim opsezima iznad 70GHz, gde je dominantan uticaj kiše, može modelirati kao zavisnost kapaciteta veze od parametara kišne ćelije.

2.4.1. Prostiranje signala na opsezima iznad 70GHz

Na osnovu jednačine prostiranja radio-talasa opisane u literaturi [Ivanek 89], [ITU-R Rec. P.530-13] snaga prijemnog signala n_R jednaka je:

$$n_R = p_{Tx} + G_{Tx} - a_{SP} - a_{AP} + G_{Rx} - a_F = n_{R0} - a_F \quad (2-1)$$

gde su:

p_{Tx} - izlazna snaga predajnika (dBm)

G_{Tx} - dobitak predajne antene (dBi)

a_P - slabljenje u slobodnom prostoru (dB)

a_{AP} - slabljenje usled apsorpcije kiseonika i vodene pare (dB)

G_{Rx} - dobitak prijemne antene (dBi)

a_F - slabljenje usled fedinga na trasi (dB)

n_{R0} - snaga signala u prijemniku u odsustvu fedinga (dBm)

Slabljenje u slobodnom prostoru a_{SP} potiče od prostiranja talasnog fronta i za ovu primenu pogodno je izraziti u obliku:

$$a_P = 92.4 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} l \quad (2-2)$$

gde su:

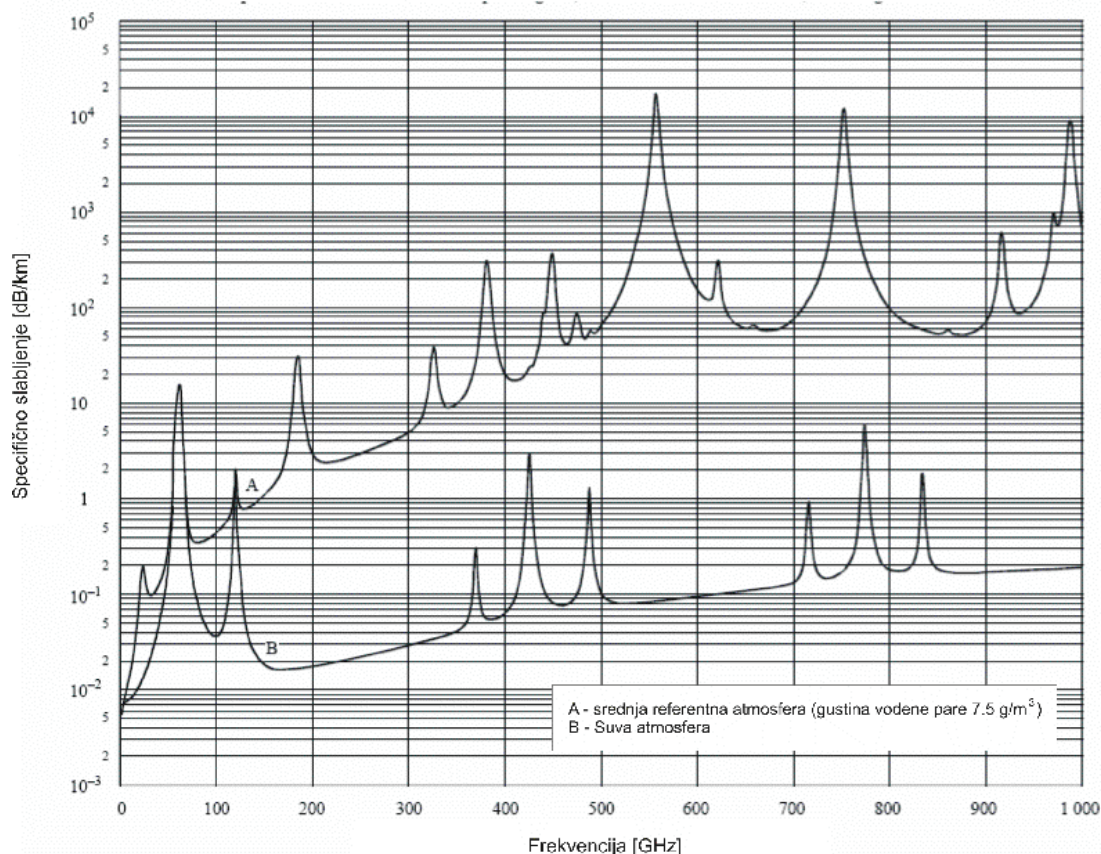
f - frekvencija [GHz]

l - dužina deonice [km]

92.4 - konstanta jednaka $10 \log_{10}(4\pi / c \cdot 1GHz \cdot 1km)$,

c - Brzina svetlosti ($3 \cdot 10^8$ m/s)

Na Sl. 2-6 je prikazano slabljenje usled apsorpcije kiseonika i vodene pare [ITU-R Rec. P.676].



Sl. 2-6. *Apsorpcija kiseonika i vodene pare u funkciji frekvencije*

U frekvencijskom opsegu oko 60GHz postoji vrlo izražen lokalni maksimum slabljenja koji iznosi čak do 15dB/km, što ograničava domet ovih veza na vrednost ispod 2km. Zbog toga je taj opseg u većini zemalja nelicenciran [OfW 369], [FCC-05-45]. Na frekvencijama iznad ovog lokalnog maksimuma a_{AP} ima prihvatljivu vrednost,

što omogućava realizaciju veza i do 10km, u zavisnosti od ostalih klimatskih parametara. Na frekvenciji 80GHz ova vrednost iznosi 0.4dB/km.

Prag prijema $n_{RT}(\text{BER})$ predstavlja potrebnu snagu prijemnog signala koja je potrebna da verovatnoća greške u prenosu ne bude veći od zadate vrednosti. Ova zavisnost može se definisati izrazom:

$$n_{RT}(\text{BER}) = 10 \log kT + 10 \log B_{RF} + \text{NF} + E_b / N_o(\text{BER}) \quad (2-3)$$

gde su:

k - Boltzmanova konstanta $1.38 \cdot 10^{-23} [\text{m}^2 \text{ kg} / (\text{s}^2 \text{ K})]$

T - apsolutna temperatura [K]

B_{RF} - širina zauzetog radio-frekvencijskog opsega [Hz]

NF - faktor šuma [dB]

E_b/N_o - potreban odnos energije po bitu E_b i spektralne gustine snage šuma N_o za koji je verovatnoću greške u prenosu manji od datog BER (zavisi od primenjene modulacije i zaštitnog kodovanja)

Razlika nivoa prijemnog signala u odsustvu fedinga i praga prijema naziva se rezerva za feding a_{FM} [dB]:

$$a_{FM}(\text{BER}) = n_{R0} - n_{RT}(\text{BER}) \quad (2-4)$$

Uređaj sa većom vrednošću rezerve za feding je otporniji na promene uslova prostiranja. Tipične vrednosti rezerve za feding kreću se od 15dB do 50dB [Ivanek 89].

2.4.2. *Adaptivni protok, modulacija i zaštitno kodovanje*

Na osnovu (2.6) uočava se da se povećanje otpornosti sistema na feding može postići smanjenjem praga prijema. U praksi se primenjuju tehnike adaptivnog protoka, modulacije i zaštitnog kodovanja, koje predstavljaju kompromis između smanjenja praga prijema i smanjenja protoka. U ovom delu date su njihove karakteristike.

Prag prijema zavisi od širine propusnog opsega signala B_{RF} koji je direktno srazmeran protoku signala, odnosno kapacitetu veze kao:

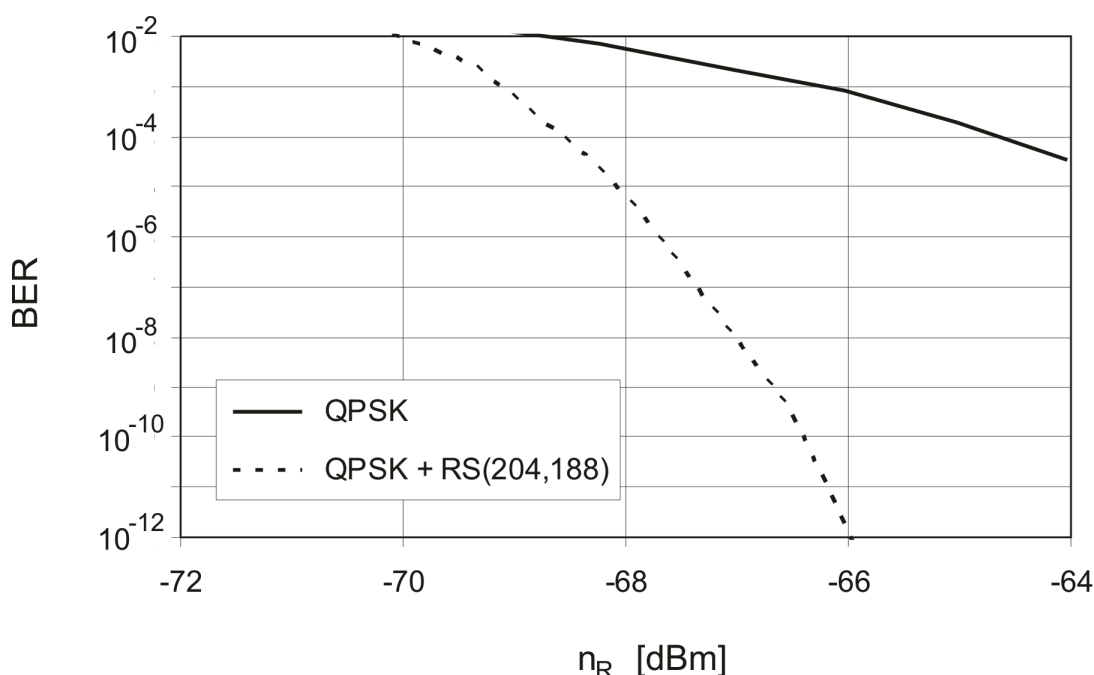
$$B_{RF} = m \cdot C \quad (2-5)$$

gde je m spektralna efikasnost modulacionog postupka iskazana količnikom (bit/Hz).

Smanjivanjem kapaciteta veze proporcionalno se smanjuje prag prijema i povećava rezerva za feding.

Drugi način povećanja rezerve za feding je upotreba robusnije modulacije ili složenijeg postupka zaštitnog kodovanja [Xiong 00]. Ova zavisnost nije tako direktna, jer se sa promenom modulacije menja i potrebna širina propusnog opsega. Ova metoda se u praksi često koristi, kao što je to slučaj na primer sa prenosom digitalizovanog televizijskog signala, gde se softverski podešava iznos kodnog količnika u opsegu od 1/2 do 7/8 [DVB-S]. U slučaju fiksirane širine emisije $B_{RF}=const$, promena postupka modulacije i zaštitnog kodovanja izaziva promenu protoka uređaja C .

Tipičan oblik krive zavisnosti verovatnoće greške u prenosu od snage prijemnog signala prikazan je na Sl. 2-7. Proračun je izvršen pod sledećim uslovima: $B_{RF}=1.4\text{GHz}$, $NF=10\text{dB}$, temperatura je sobna, primenjena je QPSK modulacija bez zaštitnog kodovanja i sa Reed-Solomonovim zaštitnim kodom RS (204,188) koji se koristi kao unutrašnji kod u DVB-S standardu.



Sl. 2-7. Primer zavisnosti verovatnoće greške u prenosu od snage prijemnog signala za uređaj kapaciteta 1Gbit/s sa QPSK modulacijom sa i bez Reed-Solomonovog zaštitnog kodovanja

U sistemima za paketski prenos, kao što su IP sistemi, moguće je poboljšanje praga prijema, odnosno rezerve za feding, u toku samog rada uređaja. Time se dobija sistem adaptivan na uslove prostiranja. Ovi sistemi se nazivaju sistemima sa adaptivnim protokom, modulacijom i/ili kodovanjem. Kriterijum za prebacivanje sa jednog režima rada na drugi može biti nivo prijemnog signala ili nivo interferencije [Xiong 00] i obično se obavlja na principu histerezisa, kako bi se izbegla nestabilnost u radu sistema. Eventualni gubitak paketa u toku prebacivanja saobraćaja minimizovan je upotrebom redova čekanja (bafera) adekvatne dužine. Problem opterećenja redova čekanja neće biti razmatran u ovom radu. Obzirom da su deonice koje se realizuju radio-relejnim vezama iznad 70GHz veoma kratke, kašnjenje signala usled propagacije na trasi i obrade u predajniku/prijemniku je zanemarivo u odnosu na vreme reakcije protokola usmeravanja, pa nije uzeto u razmatranje u ovom radu.

Kapacitet radio-relejne veze se može predstaviti kao funkcija snage prijemnog signala [Xiong 00]. Veza može biti i u stanju prekida (engl. *link down*), kada se usled prevelikog slabljenja ne prenose podaci, odnosno kapacitet veze je jednak nuli. U slučaju da veza prenosi pakete, može se smatrati da je prenos bez greške jer se

primenom modernih postupaka zaštitnog kodovanja dobija vrlo strma kriva zavisnosti BER od n_R .

$$C = C(n_R) \quad (2-6)$$

Za analizu uticaja fedinga usled kiše u mreži radio-relejnih veza pogodno je ovu relaciju transformisati u oblik zavisnosti kapaciteta radio-relejne veze od slabljenja usled fedinga:

$$C = C(a_F) \quad (2-7)$$

te za radio-relejne veze iznad 70GHz na osnovu izračunate vrednosti slabljenja usled kiše možemo odrediti kapacitet date veze.

2.4.3. Modelovanje uticaja kiše

Kao i u nižim frekvencijskim opsezima i u ovom frekvencijskom opsegu postoje dva uzročnika fedinga na trasi a_F : višestruka propagacija i slabljenje usled kiše. U frekvencijskim opsezima iznad 18GHz dominantnu ulogu na kvalitet i raspoloživost veze realizovane na ovim frekvencijskim opsezima ima slabljenje usled kiše [Ivanek 89], te se efekti višestruke propagacije obično i ne uzimaju u obzir pri proračunu veze.

U literaturi [Crane 80], [ITU-R P.530-13] pokazano je da slabljenje usled kiše ima podužni karakter γ_R [dB/km] i da se može izračunati:

$$\gamma_R = K \cdot R^\alpha \quad (2-8)$$

gde su koeficijenti K i α zavisni od frekvencije i polarizacije. Konkretno vrednosti dobijene na osnovu modela oscilovanja molekula vode u prisustvu elektromagnetnog polja mogu se pronaći u literaturi [ITU-R Rec. P.838-3]. Eksperimentalni rezultati dati u literaturi [Hirata 09] pokazuju dobro slaganje sa ovim modelom.

Ukupno slabljenje usled kiše na jednoj radio-relejnoj deonici dobija se kao integral podužnog slabljenja. Za ovaj proračun potrebno je poznavati vrednost intenziteta kiše duž cele deonice.

$$a_R = \int_0^L K \cdot R(l)^\alpha \cdot dl \quad (2-9)$$

Verovatnoća greške u prenosu BER (engl. *Bit Error Rate*) na datoj radio-relejnoj vezi zavisi od nivoa prijemnog signala i zavisi od karakteristika primenjenog radio-relejnog uređaja: kapaciteta, vrste modulacije, postupka zaštitnog kodovanja i faktora šuma prijemnika [Xiong 00].

Prema standardizovanom postupku za projektovanje radio-relejnih veza [ITU-R P.530-13], [Ivanek 89] određuje se procenat neraspoloživosti veze, odnosno vremena u kome je slabljenje usled fedinga na trasi veće od rezerve za feding ($a_F > a_{FM}$). Za veze sa adaptivnom modulacijom određuje se procenat vremena u kome veza radi sa punim kapacitetom, redukovanim kapacitetom i u kome je veza neraspoloživa.

Procenat vremena u kome je veza neraspoloživa dobija se rešavanjem integralne jednačine (2-4), u kojoj figuriše kumulativna funkcija raspodele intenziteta kiše $R(r)$. Kako je kumulativna funkcija raspodele intenziteta kiše lokalnog karaktera i najčešće nepoznata u analitičkom obliku, u literaturi [Crane 80], [ITU-R P.530-13] su date aproksimacije za određivanje procenta neraspoloživosti veze usled kiše, u kojima figuriše vrednost kumulativne raspodele intenziteta kiše za 0.01% vremena neraspoloživosti $R_{0.01\%}$. Na osnovu ovog postupka izračunavanja za frekvencijske opsege iznad 70 GHz izračunati su dometi veza, koji za teritoriju Srbije iznose do oko 8km za procenat neraspoloživosti 0.05% vremena.

Kao zaštitna mera za poboljšanje performansi radio-relejnih veza iznad 70GHz, kod kojih značajnu ulogu ima slabljenje usled kiše, preporučuje se primena zaštitne putanje (engl. *path diversity*) [ITU-R P.530-13]. Istraživanja su pokazala da korelisanost

intenziteta kiše merena na dve lokacije eksponencijalno opada sa njihovim međusobnim rastojanjem.

Detaljnija istraživanja na bazi mernih sonde, radarskih slika i/ili satelitskih snimaka omogućila su definisanje modela uticaja kiše. Pokazano je da se kiša javlja u vidu kišne ćelije [Bonati 99], koju karakteriše prostorna raspodela intenziteta kiše.

Postoje dva tipa kišnih ćelija: umerena (engl. *stratiform*) i jaka (engl. *convective*). Umerena kišna ćelija ima relativno mali intenzitet kiše (do 20mm/h) uniformno raspoređen u prostoru i relativno veliki poluprečnik (preko 5km). Uzimajući u obzir ove vrednosti i vrednosti tipičnih rezervi za feding u frekvencijskim opsezima iznad 70GHz, za većinu usmerenih radio-relejnih veza ovakva kišna ćelija ne degradira performanse veze. Drugi tip kišne ćelije je jaka, sa velikim intenzitetom kiše u centru ćelije koji opada ka periferiji. Istraživanja su pokazala da postoji inverzna korelisanost prečnika kišne ćelije i maksimalnog intenziteta kiše [Matricciani 00], [Enjamio 03]. Rastojanja između većeg broja kišnih ćelija iznose značajno više od deset kilometara [Abdou 03], [Forero 08], te se za potrebu analize metoda zaštite saobraćaja u mrežama iznad 70GHz može posmatrati samo uticaj jedne kišne ćelije.

U literaturi postoji više modela raspodele intenziteta kiše u kišnoj ćeliji kao što su na primer: EXCELL-eksponencijalni [Bonati 99], HYCELL-elipsoidalno Gausovski [Feral 03] i Gausovski [Sinka 02]. U ovom radu korišćen je Gausovski model, u kome je intenzitet kiše na rastojanju d od centra kišne ćelije definisan izrazom

$$R(d) = R_{\max} \exp(-0.5 \cdot (3d / 0.8\rho)^2), d < \rho \quad (2-10)$$

gde su:

d - rastojanje od centra kišne ćelije [km]

$R_{\max}$ - maksimalni intenzitet kiše u centru kišne ćelije [mm/h]

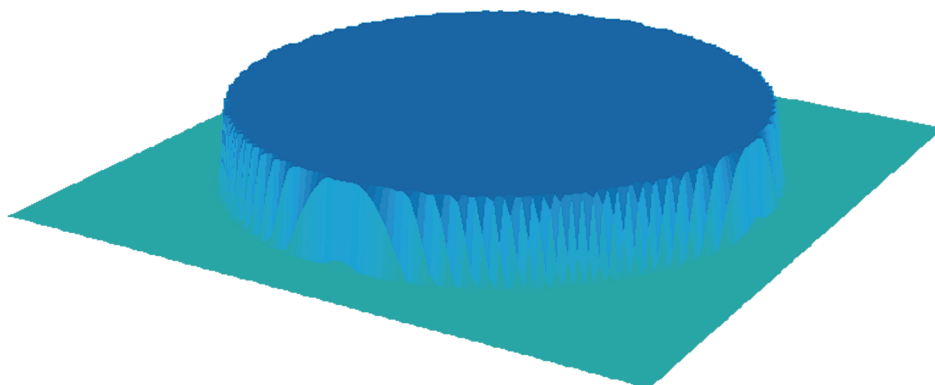
ρ - poluprečnik kišne ćelije [km]

Kišna ćelija se u prostoru kreće nošena vetrom. Za različita geografska područja u literaturi su prikazane različite brzine vetra i različite verovatnoće njegovog pravca i smera [Bonati 99], [Enjamio 03]. Za dalja istraživanja u ovom radu pretpostavili smo intenzitet brzine kretanja kišne ćelije od 10m/s, a pravac, smer i početna pozicija se mogu menjati. Na Sl. 2-8. su prikazane raspodele intenziteta kiše za različite tipove kišne ćelije date u literaturi: cilindrična raspodela za umerenu kišnu ćeliju, eksponencijalna i Gausovska raspodela za jaku kišnu ćeliju.

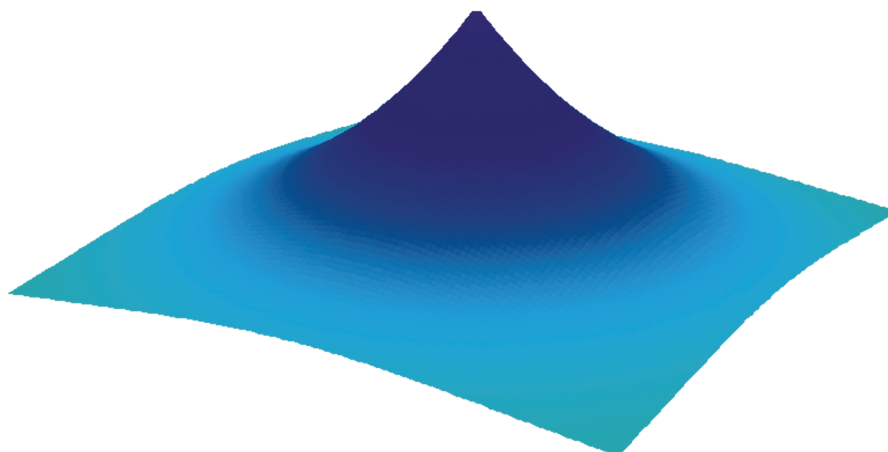
Na osnovu svega navedenog, model veze iznad 70GHz definisan je kapacitetom veze u datom trenutku, koji je funkcija ostvarene rezerve za feding na konkretnoj vezi, parametara kišne ćelije: koordinate centra kišne ćelije, $R_{\max}$ i ρ na osnovu kojih se prema izrazu (2.4) računa slabljenje.

Takođe, ovaj model veze se može primeniti i za radio-relejne veze u frekvencijskim opsezima iznad 38GHz i u nižim frekvencijskim opsezima (od 18GHz do 38GHz) gde slabljenje usled kiše ima dominantnu ulogu u odnosu na višestruku propagaciju.

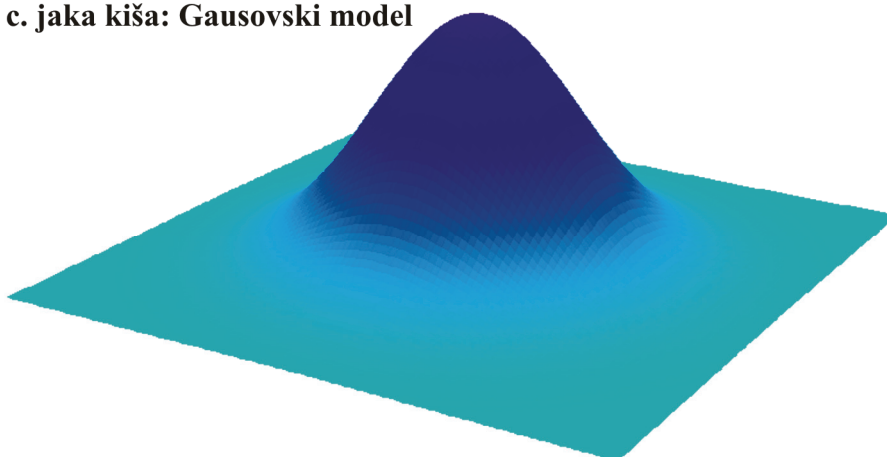
a. umerena kiša: cilindrični model



b. jaka kiša: eksponencijalni model



c. jaka kiša: Gausovski model



Sl. 2-8. *Tipovi kišnih ćelija: a)umerena kiša cilindrični model, b) jaka kiša eksponencijalni model, c) jaka kiša Gausovski model*

2.5. Simulaciono okruženje OPNET i NS2

Za simulaciju prenosa paketa kroz IP mrežu razvijeni su različiti programi među kojima se najčešće koriste NS2 [Ns2] i OPNET [Opnet]. Korišćenjem ovih programa omogućena je simulacija mehanizma usmeravanja paketa u usmerivačima tako što se simuliraju redovi čekanja sa konačnim brzinama prebacivanja paketa iz dolaznih u odlazne redove čekanja prema tabeli usmeravanja. Model veze opisuju verovatnoća greške u prenosu, broj izgubljenih paketa i konačno kašnjenje. Implementirani su realni protokoli usmeravanja (mehanizam održavanja susednosti, plavljenje LSA paketa ili razmena tabela usmeravanja i obnavljanja tabela usmeravanja). Pored usvajanja odgovarajućih modela mrežnih elemenata u simulaciji mreže od vrlo bitnog značaja je definisanje raspodele saobraćaja (odnosno paketa) koje generišu korisnici mreža. Namena ovih programa je simulacija reakcije i performansi mreže pri zadatoj saobraćajnoj pobudi. Kao rezultat simulacije obično se posmatraju parametri kvaliteta usluge QoS (engl. *Quality of Service*) bitni za datu primenu [ITU-T Y.1541]. Trajanje simulacije može biti jako dugo u slučajevima malo kompleksnijih mreža.

2.6. Reakcija protokola usmeravanja na promene stanja veza izazvane kišom

U radovima [Peric IST 05], [Jabbar 08] ukazano je na nedostatke primene realnih protokola usmeravanja u mrežama kod kojih su radio-relejne veze realizovane u frekvencijskim opsezima kod kojih slabljenje usled kiše ima dominantnu ulogu na pojavu neraspoloživosti i degradacije kvaliteta veze. U ovim radovima primenjeni su modeli kišne ćelije slični onima opisanim u poglavlju 2.4.

U [Peric IST 05] su analizirani najčešće korišćeni protokoli usmeravanja u slučaju kada su primenjeni u IP mreži povezanoj radio-relejn timerima u frekvencijskim opsezima 23GHz i 38GHz u prisustvu prekida izazvanim slabljenjem usled kiše. Iako su ove frekvencije znatno niže u odnosu na frekvencijski opseg 70GHz, dobijeni zaključci su primenljivi.

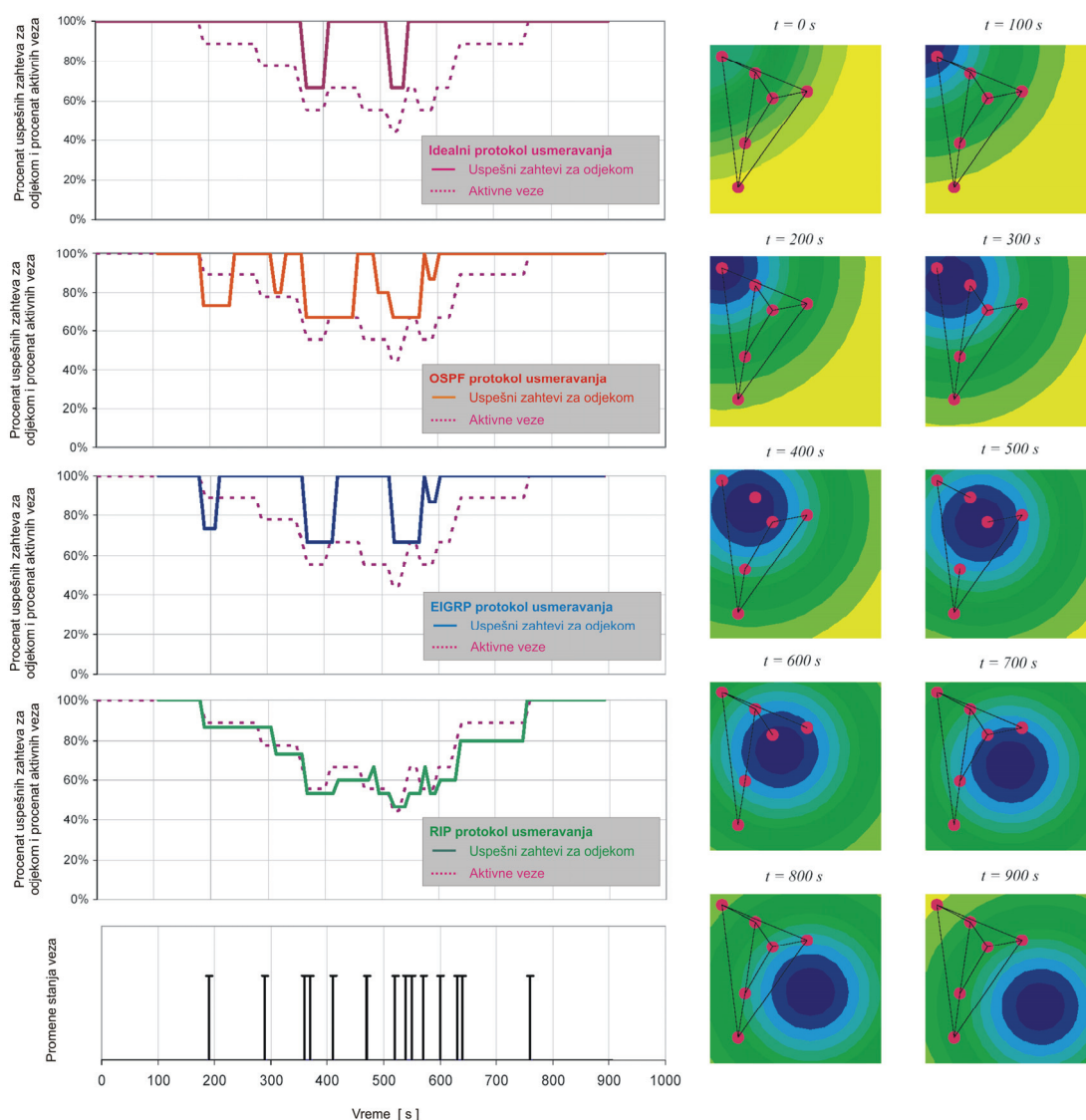
Izvršena je računarska simulacija u programu OPNET. U ovom simulacionom okruženju predstavljena je topologija mreže. U svakom čvorištu se nalazi usmerivač, a usmerene veze definisane su svojim kapacitetom.

Modelovanje prekida izvršeno je korišćenjem modela veze koji u određenom vremenskom intervalu odbacuje pakete, tj. ne prosleđuje ih na drugi kraj veze. Vremenski intervali koji su upisani kao ulazni parametri ovih modela su dobijeni analizom kretanja kišne ćelije u kojoj su pretpostavljeni njeni parametri (intenzitet kiše u centru, prečnik, brzina, pravac i smer kretanja kišne ćelije). Kao saobraćajni zahtev korišćena je komanda zahtev za odjekom (engl. *echo request*) definisana u ICMP protokolu (engl. *Internet Control Message Protocol*). Zahtev za odjekom upućuje svaki usmerivač svakom drugom usmerivaču u mreži. Analiziran je procenat uspešnih zahteva za odjekom, koji su stigli na odredište.

Rezultat ove simulacije je skup grafika relativnog broja uspešnih zahteva za odjekom za različite protokole usmeravanja. Referentni grafik je dat za slučaj "idealnog" protokola kod koga je uslov za usmeravanje postojanje aktivne veze između dva čvorišta. U realnom slučaju, protokoli usmeravanja ne usmeravaju pakete dok se ne uspostave putanje usmeravanja, a takođe, postoji i vreme detekcije prekinute veze. Grafik relativnog broja uspešnih zahteva za odjekom za "idealni" protokol usmeravanja dobijen je simulacijom u programskom paketu Matematica [Wolfram 03].

Kod realnih protokola usmeravanja bitan uticaj na performanse i ispunjenje saobraćajnih zahteva imaju:

- vreme za koje usmerivač detektuje prekid veze
- vreme za koje usmerivač uspostavi novu vezu



Sl. 2-9. Relativni broj uspešnih zahteva za odjekom dobijen simulacijom različitih protokola usmeravanja.

Rezultati su prikazani na Sl. 2-9. Primećuje se da pomeranje kišne ćelije ka centru mreže izaziva prekide na nekim vezama. U trenucima oko 400s i 540s nastaju dva prekida u mreži koja su uočljiva i u slučaju idealnog protokola usmeravanja. Za prikazano vreme, nastaje 11 promena stanja veza u mreži.

Protokoli usmeravanja ne prate brze promene u topologiji mreže i kao rezultat broj neuspešnih zahteva za odjekom se povećava. Kao što je i očekivano, usled definicije protokola na osnovu vektora udaljenosti, RIP protokol ne uspeva da prati brze promene i praktično su raspoložive samo putanje koje sadrže veze koje nisu prekinute. OSPF

uspeva da konvergira posle vremena reakcije i uspostavlja se povezan mrežni graf, ali u slučaju čestih promena stanja veza javlja se značajan broj neuspešnih zahteva za odjekom.

Prema rezultatima simulacije, protokol EIGRP najbolje prati promene topologije mreže, rezultat koji se dobija je bolji od OSPF, ali i dalje lošiji od idealnog protokola. Protokol EIGRP ima brže vreme reakcije usled unapred izračunatih rezervnih putanja koje trenutno preuzimaju saobraćaj u trenucima kada je glavna putanja u prekidu, bez potrebe za dodatnim preusmeravanjem.

U [Jabbar 08] došlo se do zaključka da je potreban zahtev za metodu zaštite saobraćaja da se obezbedi vreme obnavljanja putanje u trajanju od 50ms. Ovaj zahtev je preuzet iz SONET/SDH standarda [Perros 05].

Predložena su dva pravca metoda za zaštitu saobraćaja bazirana na algoritmu na osnovu promene stanja veze koja optimizuju mrežu reaktivno ili prediktivno.

XL-OSPF adaptacija reaktivnog protokola OSPF koristi metrike veza izvedene iz podataka sa fizičkog sloja da bi se maksimizovale performanse OSPF u prisustvu degradiranih veza.

P-WARP (engl. *Predictive Weather Assisted Routing Protocol*) koristi kratkoročnu vremensku prognozu da izvrši preusmeravanje pre prekida veze.

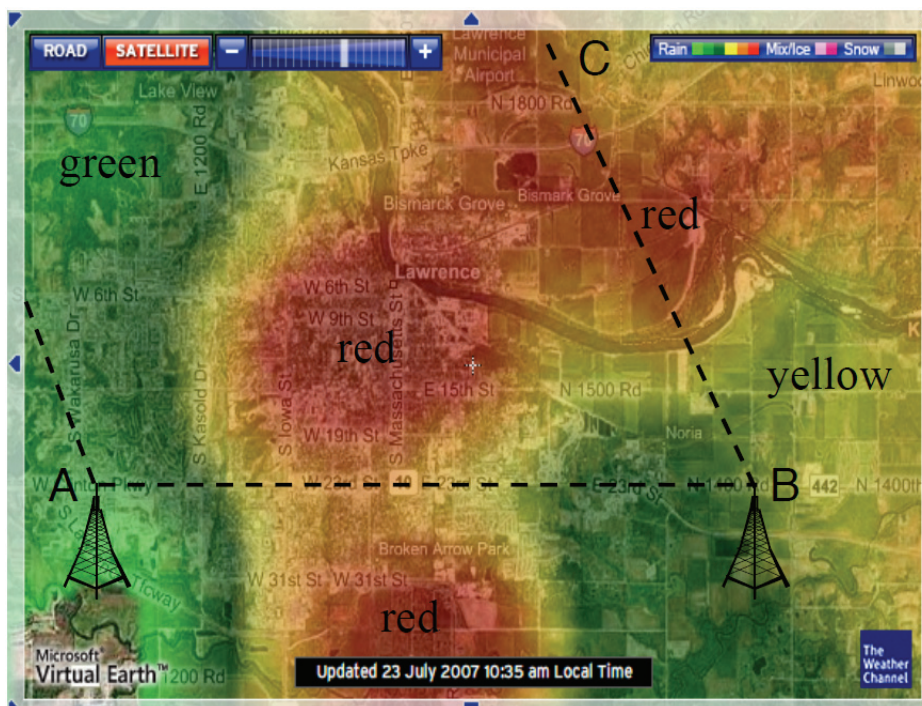
U radu je izvršeno poređenje oba pristupa u smislu efikasnosti i sposobnosti za adaptivnu optimizaciju u prisustvu prekida nastalih usled vremenskih uslova.

XL-OSPF metrika veze je proporcionalna verovatnoći greške paketa PER (engl. *Packet Error Ratio*). Da bi se odredio PER koristi se signalizacija u zaglavlju paketa (engl. *inband*) ili signalizacija sa probnim paketom (engl. *outband*). Čak i sa metrikom

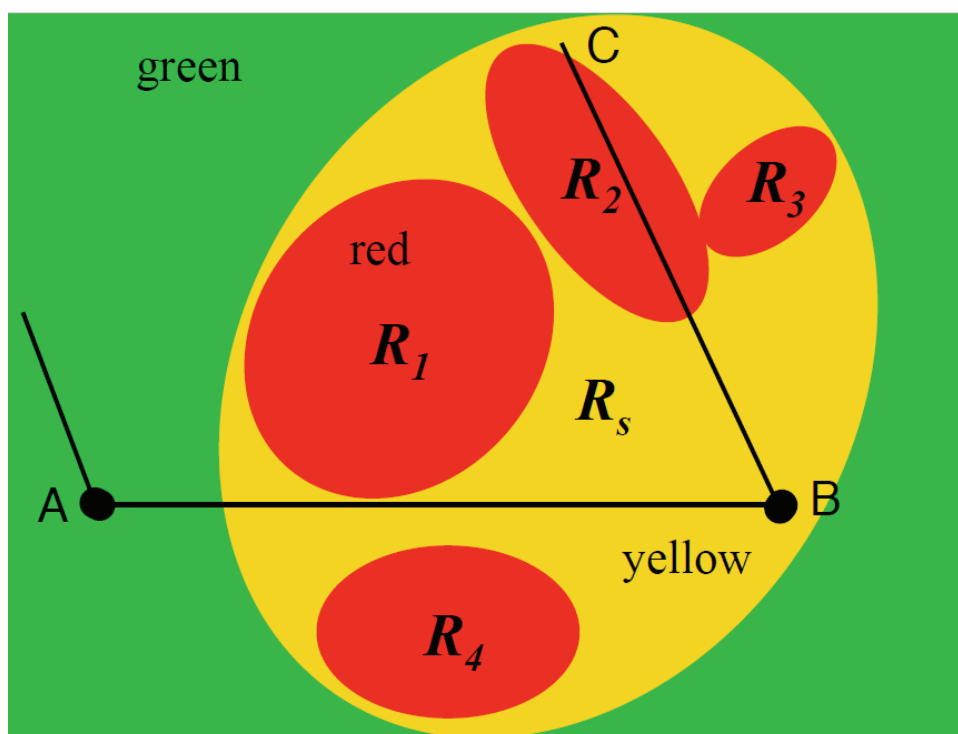
veze baziranom na greškama u prenosu, OSPF ostaje reaktivan algoritam kome je potrebno konačno vreme za adaptaciju na nove uslove prenosa. Kada aplikacija zahteva veliku pouzdanost, potrebno vreme reakcije meri se milisekundama, što dovodi do opterećenja kapaciteta signalizacionim zaglavljem, koje je neprihvatljivo čak i u širokopojasnim sistemima prenosa. Da bi se izbegli lažni alarmi, koriste se pragovi i histerezis za PER. Minimalni PER definiše rezoluciju algoritma.

U slučaju prediktivnog P-WARP protokola usmeravanja, koristi se spoljna informacija da bi se predvidelo stanje veza. Ovaj algoritam usmeravanja je takodje na osnovu stanja veza, a verovatnoća greške u prenosu se računa na osnovu podataka o vremenskim uslovima koji se dobijaju merenjem u realnom vremenu. Merenje se obavlja dopler radarom. Generišu se poruke osvežavanja WLSA slične LSA u standardnom OSPF, ali njihovo širenje kroz mrežu znatno manje opterećuje kapacitet mreže i preusmeravanje se vrši pre stvarnog prekida veze.

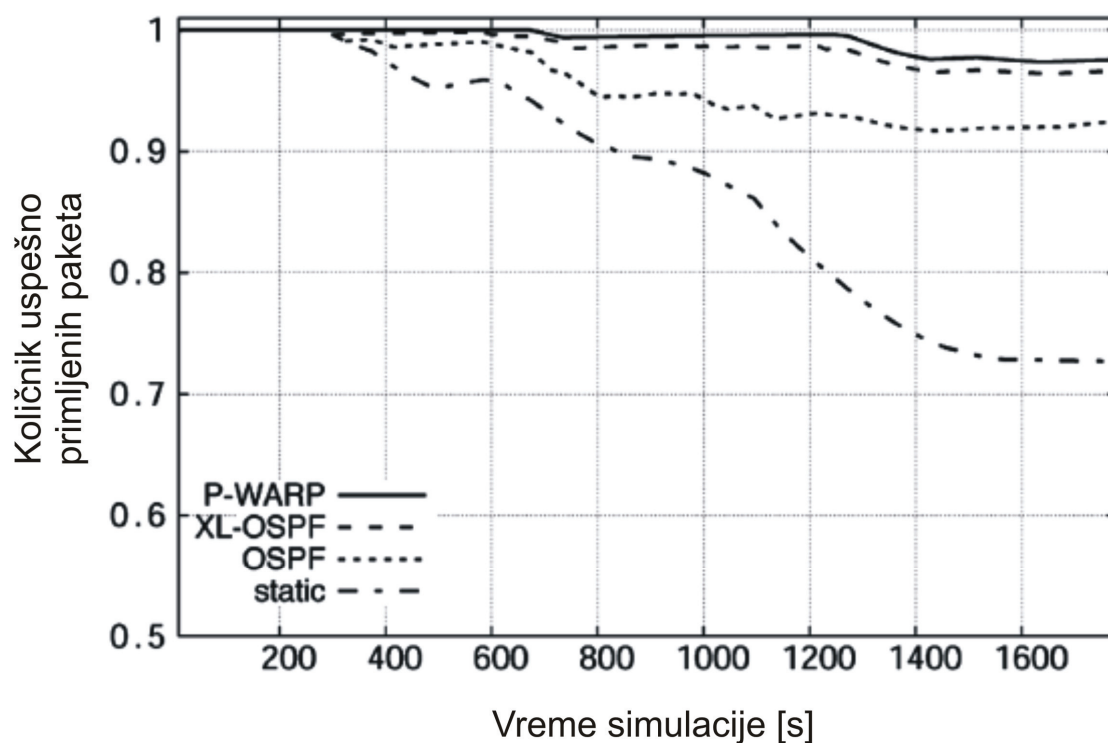
Performanse algoritama su analizirane na test mreži, pri čemu su podaci o padavinama dobijeni na osnovu radarske slike realnog kišnog događaja prikazanog na Sl. 2-10, koji je modelovan grupom pomerajućih kišnih ćelija prikazanih na Sl. 2-11. Kao kriterijum performansi mreže posmatran je količnik uspešno primljenih i poslatih paketa, rezultat je prikazan na Sl. 2-12.



Sl. 2-10 Radarska slika kišnog događaja



Sl. 2-11 Modelovanje kišnog događaja pomerajućim kišnim ćelijama



Sl. 2-12 Performanse mreže za vreme kišnog događaja za različite protokole usmeravanja

Rezultati simulacije [Jabbar 08] za statički protokol usmeravanja pokazuju najlošiji odziv na promene stanja veza. Standardni OSPF, zahvaljujući protokolu uspostavljanja susedstva, reaguje na promenu stanja veze, ali kašnjenje detekcije i preusmeravanja izazivaju značajan gubitak paketa. XL-OSPF ima bolje performanse od statičkog usmeravanja i standardnog OSPF jer može da detektuje degradiranu vezu u kraćem vremenskom intervalu prema modifikovanim metrikama veza. Kako je metrika direktno srazmerna verovatnoći greške na vezi, putanje sa velikim PER su izbegavane kad god je moguće. P-WARP je najbolji od sva četiri protokola jer može da predvidi predstojeći prekid veze preko podataka o vremenskim uslovima i može da preusmeri saobraćaj pre nego što prekid nastane.

2.7. Primena rezervnih putanja

Ideja zaštite primarne putanje rezervnom putanjom se može naći u radovima koji obrađuju optičke mreže velikog kapaciteta (nekoliko Gbit/s). U radu [Sahasrabuddhe

02], analizirane su metode zaštite koje se primenjuju u optičkim mrežama sa multipleksom talasnih dužina WDM (engl. *Wavelength Division Multiplex*). Analizirana je metoda zaštite na fizičkom nivou (engl. *WDM protection*) i na mrežnom nivou (engl. *IP restoration*). WDM zaštita na fizičkom nivou podrazumeva dodelu rezervne putanje svakoj primarnoj putanji u toku uspostavljanja poziva, na dva načina: zaštita jedinstvenom putanjom (engl. *dedicated path protection*), koji svakoj primarnoj putanji dodeljuje jedinstvenu rezervnu putanju koja ne sadrži optičke veze i talasne dužine primarne putanje i zaštita zajedničkom putanjom (engl. *shared path protection*) koja svakoj primarnoj putanji dodeljuje rezervnu putanju koja ne sadrži optičke veze i talasne dužine primarne putanje, ali koja se može koristiti i za zaštitu drugih primarnih putanja. U slučaju zaštite na mrežnom nivou, smatra se da protokol usmeravanja dinamički pronalazi alternativnu putanju kada se dogodi prekid veze, tj. vrši se preusmeravanje. U radu je pretpostavljeno da protokol usmeravanja podržava raspoređivanje saobraćaja preko više putanja. Takođe, pretpostavljeno je da se prekid može dogoditi samo na jednoj vezi [Sahasrabuddhe 02]. Rezultati predstavljeni u ovom radu pokazuju superiornost zaštite na fizičkom nivou koja ima znatno kraće vreme prilagođenja na pojavu prekida veze u mreži.

Ideja rezervne putanje je prihvaćena i u literaturi IP usmeravanja. U literaturi [RFC 5286] je opisan način obezbeđivanja lokalne zaštite saobraćaja u IP mrežama u slučaju jednog otkaza veze, čvorišta ili grupe veza zajedničkog rizika SRLG (engl. *Shared Risk Link Group*), korišćenjem alternativne putanje koja ne stvara petlje (engl. *loopfree*) do sledećeg usmerivača. Cilj je da se smanji gubitak paketa koji se dešava dok usmerivač završi konvergenciju posle promene topologije usled otkaza, time što se vreme reakcije na otkaz smanjuje na desetine milisekundi. Brz oporavak se obezbeđuje korišćenjem unapred izračunatih rezervnih putanja do sledećeg usmerivača koje ne stvaraju petlje i bezbedne za korišćenje dok se proces konvergencije u mreži završi. Ovaj jednostavan pristup ne zahteva podršku drugih usmerivača. Mogućnost za ostvarenje ovog cilja zavisi od topologije mreže. Alternativni sledeći usmerivač ne postoji za sve usmerivače. Potrebno je da bude zadovoljen uslov u kome figurišu metrike veza od izvorišnog do odredišnog i od svakog ponaosob do alternativnog sledećeg usmerivača. Taj uslov garantuje prenos bez petlji u usmeravanju.

U literaturi se mogu naći predlozi efikasnih algoritama koji imaju isti cilj, tj. da omoguće usmerivaču korišćenje više izmenjivih putanja i da raspoređivanjem saobraćaja po više takvih putanja obezbede brzo preusmeravanje saobraćaja na sigurnu putanju da bi se poboljšala raspoloživost i efikasnost mreže [Mérindol 10], [Wang 08], [Liu 07]. Jedan od najpoznatijih protokola usmeravanja koji koristi rezerve putanje je EIGRP (engl. *Enhanced Interior Gateway Protocol*) koji je implementiran u Cisco usmerivačima [Albrightson 94] i bazira na tzv. DUAL algoritmu (engl. *Diffusing Update ALgorithm*) detaljno prikazanom u [Garcia 93].

Za razliku od optičkih veza, kod radio relejnih veza se pored otkaza veze može dogoditi i smanjenje kapaciteta veze, ukoliko je primenjena metoda zaštite saobraćaja adaptivnim protokom. Takođe, na frekvencijama iznad 70GHz, uzrok prekida je modelovan pomerajućom kišnom ćelijom, te je moguće otkazivanje i više veza od jedne. U predloženim metodama zaštite rezervnim putanjama u ovom radu, formiraju se kompletne rezervne putanje između dva krajnja čvorišta, čime je onemogućena pojava petlji u usmeravanju.

2.8. Mogućnosti unapređenja

Prikazani rezultati pokazuju da ponašanje standardnih protokola usmeravanja nije zadovoljavajuće kada se direktno primene na radio-relejne veze u frekvencijskim opsezima iznad 70GHz, posebno u slučaju ako su veze vrlo visokog kapaciteta. Zbog izrazito spore konvergencije mreže protokoli na osnovu vektora udaljenosti se ne mogu primeniti na ovim frekvencijskim opsezima te se dalja unapređenja fokusiraju na protokole usmeravanja osnovu stanja veza.

Zbog velikog broja promena u mreži, konačne brzine detekcije promena i konačnog trajanja konvergencije mreži, potrebno je fokusirati se na usavršavanje protokola usmeravanja u smeru smanjivanja potrebe za preusmeravanjima. Mogućnost upotrebe zaštitne putanje kod EIGRP protokola usmeravanja pokazuje dobre osobine, ali

ograničenje da ona nije uvek na raspolaganju u ovom slučaju značajno smanjuje njenu efikasnost. Imajući to u vidu, u ovom radu je predložen koncept u kome je putanja paketa od izvorišta do odredišta unapred definisana kao i zaštitne putanje koja uvek postoji.

Primena simulacionih okruženja NS2 i OPNET za poređenje različitih metoda usmeravanja i zaštite saobraćaja ima nedostatke u vidu dugog trajanja simulacije i potrebe za unapred definisanim parametrima saobraćaja. Zbog toga je razvijen matematički model pogodan za ovu svrhu i opisan je u sledećem poglavlju.

3. MATEMATIČKI MODEL MREŽE I KRITERIJUMI ZA OCENU PERFORMANSI

U ovom poglavlju je opisan matematički model mreže i predložena su tri kriterijuma za ocenu performansi: (a) maksimizacija proporcionalno fer raspodeljenog kapaciteta veza u mreži, (b) opterećenja veza i (c) maksimizacija protoka dodeljenog pojedinačnom saobraćajnom zahtevu. Takođe je opisana implementacija matematičkog modela.

3.1. Matematički model mreže

Za opisivanje matematičkog modela mreže koristi se notacija veza-putanja (engl. *link-path notation*) [Pioro 04].

Mreža se sastoji od N čvorišta u kojima se nalaze IP usmerivači, povezani sa E veza, čiji su kapaciteti $C=\{c(e)\}$, $e=1,...,E$.

Intenziteti zahteva za saobraćajem između dva čvorišta su označeni sa $h(i,j)$, $i=1,2,...,N$, $j=1,2,...,N$. Pretpostavljeno je da između svaka dva čvorišta u mreži postoji zahtev za saobraćajem, što je iskazano u matrici saobraćajnih zahteva $\mathbf{H}=\{h(i,j)\}$, $h(i,j)>0$, $i \neq j$, i $h(i,j)=0$, $i=j$.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & h(1,2) & .. & h(1,N) \\ h(2,1) & 0 & .. & h(2,N) \\ .. & .. & 0 & .. \\ h(N,1) & .. & h(N-1,N) & 0 \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

Svaki saobraćajni zahtev $h(i,j)$ može biti opslužen različitim tokovima $x(i,j,k)$, $k=1,...,N_k(i,j)$. $N_k(i,j)$ je broj tokova koji opslužuju zahtev $h(i,j)$ i može biti različit za svaki par čvorišta (i,j) , uz uslov $N_k(i,j) \geq 1$.

Algoritam usmeravanja (engl. *routing algorithm*) dodeljuje putanju $r(i,j,k)$ svakom toku $x(i,j,k)$. Putanje se zatim memorišu u tabeli usmeravanja **R**. Definišu se vektori indikatora pripadnosti veze putanji, npr. za putanju $r(i,j,k)$, vektor pripadnosti veze putanji je **D**.

$$\mathbf{D}(i,j,k) = \{\delta(i,j,k,1), ..., \delta(i,j,k,e), ..., \delta(i,j,k,E)\} \quad (3-2)$$

pri čemu je:

$$\begin{aligned} i &= 1, 2, ..., N \\ j &= 1, 2, ..., N \\ k &= 1, ..., N_k(i,j) \\ \delta(i,j,k,e) &= \begin{cases} 1, & \text{ako veza } e \text{ pripada } r(i,j,k) \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases} \end{aligned} \quad (3-3)$$

za svaku vezu $e=1,...,E$.

Korišćenjem ove notacije definisano je ograničenje prema kome suma ukupnog broja tokova koji sadrže e-tu vezu ne sme da bude veća od kapaciteta te veze: $c(e)$, za svaku vezu u mreži $e=1,...,E$. Ovo ograničenje dato je izrazom:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N \sum_{k=1}^{N_k(i,j)} \delta(i,j,k,e) \cdot x(i,j,k) \leq c(e), \quad e=1,...,E \quad (3-4)$$

3.2. Kriterijum maksimizacije proporcionalno fer raspodeljenog kapaciteta veza u mreži

Za definisanje prvog kriterijuma za ocenu performansi usvojena je raspodela kapaciteta veza u mreži po proporcionalno fer raspodeli [Pioro 04]. Funkcija proporcionalno fer raspodele F je definisana nad matricama saobraćajnih zahteva $\mathbf{H}$, putanja usmeravanja $\mathbf{R}$ i kapaciteta veza $\mathbf{C}$. Ova funkcija se računa kao zbir logaritama, intenziteta saobraćajnih zahteva po svim putanjama i po svim vezama. Korišćenjem logaritamske funkcije ne dozvoljava se dodela nultih protoka saobraćajnim zahtevima i takođe se ni jednom korisniku ne dodeljuje preveliki protok [Pioro 04]. Funkcija proporcionalne fer raspodele računa se prema izrazu:

$$F(\mathbf{H}, \mathbf{R}, \mathbf{C}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \log(h(i, j)) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \log\left(\sum_{k=1}^{N_k(i, j)} x(i, j, k)\right) \quad (3-5)$$

Kriterijum za ocenu performansi dobija se maksimizacijom funkcije F , odnosno optimizacijom kapaciteta dodeljenih tokova, sa ograničenjem kapaciteta veza:

$$F_{\max}(\mathbf{R}, \mathbf{C}) = \max_{x(i, j, k)} (F(\mathbf{H}, \mathbf{R}, \mathbf{C})) \quad (3-6)$$

$F_{\max}$ zavisi od kapaciteta veza i načina usmeravanja, a mreža sa većim $F_{\max}$ ima nedvosmisleno bolje karakteristike prenosa. U slučaju da saobraćajni zahtev ne može biti opslužen $F_{\max} \rightarrow -\infty$. Ovaj kriterijum je izuzetno pogodan za poređenje performansi primenjenih protokola usmeravanja i metoda zaštite u različitim mrežama. Primarni cilj u mrežama koje se ocenjuju ovim kriterijumom je omogućavanje realizacije saobraćajnih zahteva između svaka dva čvorišta, a drugi cilj je dodela što većih kapaciteta, koji su proporcionalno fer raspodeljeni.

Direktna implementacija fer raspoređivanja saobraćaja na ovaj način nije jednostavna jer sam postupak izračunavanja optimalne fer raspodele tokova dugo traje.

Isto tako, ova raspodela u praksi ima opravdanja samo ako postoje zahtevi za komunikacijom svakog čvorista sa svakim u svakom trenutku, što po pravilu nije slučaj. Zbog toga se fer raspoređivanje kapaciteta veza u mreži ostvaruje tehnikom vremenske preraspodele resursa mreže (engl. *scheduling*) tako da usrednjeno po vremenu svi korisnici imaju fer raspodeljene resurse [Pioro 04]. Vremenski prozor u kome se analizira preraspodela resursa (odnosno vrši usrednjavanje) je mnogo kraće od vremena između promena nastalih usled slabljenja usled kiše i analiza uticaja širine vremenskog prozora prevazilazi obim ovog rada. Na taj način kriterijum maksimizacije proporcionalno fer raspodeljenog kapaciteta veza u mreži predstavlja samo graničan slučaj koji pruža uvid u maksimalne mogućnosti mreže u prisustvu kišne ćelije da u datom trenutku ostvari fer raspodelu saobraćaja.

3.3. Kriterijum opterećenja veza

Kao drugi kriterijum uvodi se opterećenje veza, sa ciljem indikacije potencijalnih tačaka opterećenja u mreži. Saobraćajni zahtev $h(i,j)$, $i=1,2,...,N$, $j=1,2,...,N$, $i \neq j$ se opslužuje raspoređivanjem saobraćaja (engl. *load balancing*) između tokova $x(i,j,k)$, $k=1,...,N_k(i,j)$. Element matrice raspoređivanja saobraćaja između tokova $\mathbf{B}$ je faktor raspoređivanja $b(i,j,k)$.

$$b(i,j,k) = \frac{x(i,j,k)}{h(i,j)}, \quad k = 1, ..., N_k(i,j) \quad (3-7)$$

očigledno da važi da je:

$$\sum_{k=1}^{N_k(i,j)} b(i,j,k) = 1, \text{ odnosno } b(i,j,k) \leq 1 \quad (3-8)$$

Polazeći od matrice $\mathbf{B}$ formiran je vektor opterećenja veza $\mathbf{L}_l$ čiji su elementi jednaki broju putanja koje sadrže vezu e.

$$L_l(e) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{N_k(i,j)} b(i,j,k) \cdot \delta(i,j,k,e), \quad e = 1, \dots, E \quad (3-9)$$

Uočimo da u specijalnom slučaju, kada je $N_k(i,j)=1$, $i=1, \dots, N$, $j=1, \dots, N$, odnosno kad se svaki saobraćajni zahtev opslužuje samo jednom putanjom, element vektora opterećenja $L_l(e)$ je ceo broj koji predstavlja broj saobraćajnih zahteva koje opslužuje data veza. Ukoliko postoji raspoređivanje saobraćaja po različitim tokovima, $L_l(e)$ je racionalan broj koji predstavlja ekvivalentan broj tokova koje opslužuje data veza.

Pošto je opterećenje veze proporcionalno broju tokova koje ona opslužuje, a obrnuto proporcionalan njenom kapacitetu, jednostavnim deljenjem $L_l(e)$ sa kapacitetom veze dobijamo vektor normalizovanih opterećenja veza $\mathbf{L}$:

$$L(e) = \frac{L_l(e)}{c(e)}, \quad e = 1, \dots, E \quad (3-10)$$

Možemo smatrati da je "usko grlo" u mreži najopterećenija veza, jer je na njoj u realnim uslovima najverovatnija pojava opterećenja, te definišemo drugi kriterijum kvaliteta mreže maksimalno normalizovano opterećenje veze $L_{\max}$:

$$L_{\max} = \max_{e \in \{1, \dots, E\}} L(e) \quad (3-11)$$

Napomenimo da pored "uskog grla", od interesa može biti i srednje opterećenje veza u mreži, dok minimalna vrednost nema praktičnog značaja. Definicija srednjeg opterećenja veza u mreži L_{ave} data je izrazom:

$$L_{\text{ave}} = \frac{1}{E} \sum_{e=1}^E L(e) \quad (3-12)$$

Bez obzira koju od ove dve definicije za izračunavanje kriterijuma primenjujemo, mreža koja ima manje vrednosti ima bolje performanse, odnosno u uslovima realnog saobraćaja mogućnost pojave opterećenja je manja. Uočimo da, slično kao i u slučaju kriterijuma maksimizacije proporcionalno fer raspodele kapaciteta datog u jednačini (3-6), u slučaju da se neki od saobraćajnih zahteva ne može opslužiti jer je usmeren preko

veze sa nultim kapacitetom, kriterijum dobija beskonačnu vrednost. Na taj način i u ovom slučaju je primarni cilj omogućavanje realizacije saobraćajnih zahteva između svaka dva čvorišta.

3.4. Kriterijum maksimalnog protoka dodeljenog pojedinačnom zahtevu

Maksimalni protok koji se može ostvariti pri realizaciji saobraćajnog zahteva između čvorišta m i n , $S(m,n)$, $m=1,...,N$, $n=1,...,N$, je moguće postići kada su svi ostali saobraćajni zahtevi jednaki nuli, te u tom slučaju matrica saobraćajnih zahteva $\mathbf{H}$ ima oblik:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}|_{S(m,n)} &= \{h(i,j)\}|_{S(m,n)} \\ h(i,j)|_{S(m,n)} &= \begin{cases} S(m,n), i=m, j=n \\ 0, i \neq m, j \neq n \end{cases} \end{aligned} \quad (3-13)$$

Vrednost maksimalnog protoka $S(m,n)$ se određuje uzimajući u obzir uslov ograničenja kapaciteta svih veza i parametre raspoređivanja protoka. Tada je vektor opterećenja veza $L_l(e)$ dat izrazom:

$$L_l(e)|_{S(m,n)} = \sum_{k=1}^{N_k(m,n)} b(m,n,k) \cdot \delta(i,j,k,e), \quad e=1,...,E \quad (3-14)$$

Pošto su ostali saobraćajni zahtevi jednaki nuli i postoji raspoređivanje saobraćaja između tokova (koeficijent raspoređivanja saobraćaja $b(i,j,k) \leq 1$), vektor opterećenja veza pri maksimalnom protoku dodeljenom pojedinačnom zahtevu $L_l(e)|_{S(m,n)} \leq 1$, $e=1,...,E$, te se veze mogu opteretiti još većim saobraćajem dok opterećenje najopterećenije veze ne bude jednako jedinici. Označimo koeficijent povećanja protoka sa K_{TP} , gde je:

$$K_{TP} = \frac{1}{\max_{e=1,\dots,E} L_l(e) \Big|_{S(m,n)}} \quad (3-15)$$

Na taj način se ukupni protok $S(m,n)$ dobija sabiranjem maksimalnih protoka svih tokova $x(m,n,k)$, $k=1,\dots,N_k(m,n)$ pomnoženim konstantom K_{TP} i koeficijentom raspoređivanja za dati tok $b(m,n,k)$, $k=1,\dots,N_k(m,n)$. Maksimalni protok datog toka jednak je najmanjem kapacitetu veze koje realizuju dati tok, odnosno pripadaju putanji $r(m,n,k)$. To formalno možemo izraziti kao:

$$S(m,n) = \sum_{k=1}^{N_k(m,n)} K_{TP} \cdot b(m,n,k) \cdot \min_{e \in r(m,n,k)} c(e) \quad (3-16)$$

Kao kriterijum kvaliteta mreže uzima se srednja vrednost maksimalnog protoka po svim saobraćajnim zahtevima S_{ave} :

$$S_{ave} = \frac{1}{N \cdot (N+1)} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1, n \neq m}^N S(m,n) \quad (3-17)$$

Uočimo da kod ovog kriterijum cilj nije ostvarivanje svih saobraćajnih zahteva, već se dobija uvid u granične mogućnosti date mreže kada je od značaja procena maksimalnog ostvarivog kapaciteta za pojedinačni saobraćajni zahtev.

3.5. Implementacija matematičkog modela

Opisani matematički model implementiran je u programskom okruženju Wolfram Research Mathematica [Wolfram 03]. Ovo okruženje je izabrano zbog svojih specifičnosti koje predstavljaju značajnu prednost u pogledu efikasnosti implementacije datog modela.

Najznačajnija osobina koju ovo okruženje omogućava je jednostavan rad sa nehomogenim strukturama podataka, kao što su na primer liste listi različitih dužina, pri čemu elementi liste ne moraju biti istog tipa. Ovakve strukture su korišćene za formiranje topologije mreže, tabela za usmeravanje paketa i implementaciju kriterijuma za ocenu performansi [Meader 97].

Za implementaciju algoritma usmeravanja po metodi najkraće putanje korišćen je paket *Combinatorica* (set eksternih funkcija programskog paketa *Mathematica*) [Pemmaraju 03]. Najznačajnije su funkcije za opisivanje grafa i traženja najkraće putanje po Dijkstra algoritmu [Dijkstra 59]. Za jedan broj saobraćajnih zahteva može da postoji više najkraćih putanja, a implementirana funkcija nalazi samo jednu od njih. Da bi se ovo ograničenje prevazišlo implementirana je nova funkcija koja ponavlja Dijkstra algoritam na mrežama dobijenih ukidanjem jedne veze u originalnoj mreži. Zatim se skupovnim funkcijama unije pronalaze skupovi najkraćih putanja. Ukupan broj ponavljanja Dijkstra algoritma je jednak broju veza u mreži E . Ovo proširenje algoritma omogućava pronalaženje bar još jedne najkraće putanje u slučajevima kada ih ima više.

Veoma je značajna upotreba funkcije *NMaximize* za nelinearnu numeričku optimizaciju sa ograničenjima pri određivanju vrednosti funkcije proporcionalno fer raspodele $F_{\max}$ prema izrazu (4-6). Zbog oblika izraza koji se optimizuje i velikog broja promenljivih (nekoliko stotina) ova funkcija koristi kombinaciju RandomSearch, Nelder-Mead, Differential Evolution i Simulated Annealing algoritama [Champion 08].

Za simulaciju efekata na fizičkom nivou opisanih u poglavlju 3, značajna je upotreba funkcija za numeričku integraciju pomoću kojih se efikasno određuje slabljenje koje kišna ćelija uzrokuje na svim vezama u mreži [Bahder 95].

Interakcija fizičkog i mrežnog nivoa, opisana promenom kapaciteta veza u mreži u funkciji parametara kišne ćelije, jednostavno je rešena upotrebom pomenutih kompleksnih struktura podataka. Takođe je veoma značajna mogućnost zadržke izvršavanja određenih funkcija pomoću čega je implementirano dinamičko ponašanje

mreže u prisustvu pomerajuće kišne ćelije, o čemu se više detalja može naći u [Perić ETRAN 10].

Napomenimo na kraju i veoma značajne funkcije za grafičku vizualizaciju promena u mreži kao što su promene kapaciteta veza uzrokovane pomerajućom kišnom ćelijom, zatim prikazivanje putanja između odgovarajućih čvorišta i sl. [Farin 08].

4. PREDLOG METODA ZA ZAŠTITU SAOBRAĆAJA U MREŽI

U ovom poglavlju opisani su predloženi novi protokoli OSPF-BP i OSPF-BN, kao i referentni protokoli OSPF i OSPF-C. Dat je detaljan opis novih predloženih algoritama za izračunavanje rezervnih putanja PHY i NOPHY koji se koriste u protokolima OSPF-BP i OSPF-BN. Rezervne putanje se izračunavaju unapred, pre početka prenosa podataka. Podaci se prenose i po glavnoj i po rezervnoj putanji, a saobraćaj se raspodeljuje između ovih putanja predloženim iterativnim algoritmom koji je opisan u ovom poglavlju. U iterativnom algoritmu periodično se računaju koeficijenti raspoređivanja, pa se raspoređivanje usklađuje sa promenama opterećenja veza u mreži. Time je postignuto usklađivanje sa trenutnim promenama kapaciteta veza koje nastaju usled kiše, a izbegnute su nestabilnosti koje bi nastale usled preusmeravanja, tj. ponovnog izračunavanja putanja.

4.1. Opis predloženog novog protokola OSPF-BP

Novi protokol OSPF-BP zasnovan je na standardnom OSPF protokolu sa metrikom $K/c(e)$, $e=1,...,E$, $K=\text{const}$ [RFC 2328], u kome se pored glavnih putanja koriste i rezervne putanje. Za izračunavanje glavnih putanja koristi se Dijsktra algoritam najkraće putanje. Kada su sve veze u mreži aktivne i imaju nominalni kapacitet, u tabelu usmeravanja su upisane glavne putanje za svaki par čvorišta (i,j) u mreži. Pored glavnih putanja izračunavaju se i rezervne putanje, tako da zahtevi za saobraćajem mogu biti raspodeljeni između dva toka: $x(i,j,1)$ za glavne putanje i $x(i,j,2)$ za rezervne putanje, $i=1,...,N$, $j=1,...,N$ and $i \neq j$. Raspoređivanje saobraćaja između glavne i rezervne putanje

detaljno je opisano u poglavlju 4.4. Rezervne putanje se izračunavaju unapred, pre početka prenosa podataka po PHY algoritmu, koji uzima u obzir efekat na fizičkom sloju - uticaj slabljenja usled kiše koji je dominantan uzrok prekida radio-relejnih veza u frekvencijskim opsezima iznad 70GHz.

Algoritam PHY sastoji se iz sledećih koraka:

1. Određuju se parametri kritične kišne ćelije koja ima maksimalnu vrednost intenziteta kiše u centru a da pri tome ne rastavlja graf mreže na dva dela. Ovakvu kišnu ćeliju nazivamo kritična kišna ćelija CRC (engl. *Critical Rain Cell*) [Peric TELSIKS 05]. Njeni parametri su: maksimalni intenzitet u centru kritične kišne ćelije $R_{\max}^{\text{CRC}}$ i odgovarajući poluprečnik ρ^{CRC} .

Vrednosti maksimalnog intenziteta kiše u centru kritične kišne ćelije $R_{\max}^{\text{CRC}}$ i odgovarajućeg poluprečnika ρ^{CRC} mogu se izračunati Monte-Karlo simulacijom, tako što unutar mreže slučajno izaberemo pozicije centra kišne ćelije i za svaku od njih povećavamo maksimalni intenzitet kiše u centru kišne ćelije sve dok graf postane nepovezan. Dovoljna tačnost određivanja vrednosti $R_{\max}^{\text{CRC}}$ iznosi $\pm 1\text{mm/h}$. Odgovarajući poluprečnik je poluprečnik kritične kišne ćelije ρ^{CRC} [Peric TELSIKS 05].

2. Za svaku vezu u mreži određuje se minimalni kapacitet $c^{\text{CRC}}(e)$, koji će veza imati pod dejstvom kritične kišne ćelije.

Najgori slučaj je slučaj kada je centar kritične kišne ćelije pozicioniran na sredini veze. Računa se slabljenje usled kiše, nivo prijemnog signala i odgovarajući kapacitet veze $c^{\text{CRC}}(e)$, $e=1,\dots,E$.

3. Za svaku vezu određuje se cena na osnovu $c^{\text{CRC}}(e)$. Formula za određivanje cene je ista kao u OSPF protokolu: $K/c^{\text{CRC}}(e)$, $e=1,\dots,E$, $K=\text{const}$.

4. Dijkstra algoritmom najkraće putanje dobijaju se PHY rezervne putanje.

Korišćenjem Dijkstra algoritma i nove metrike veze $K/c^{\text{CRC}}(e)$, $e=1,\dots,E$, dobijaju se PHY rezervne putanje.

Na osnovu opisanog algoritma uočava se da se svaki saobraćajni zahtev može realizovati upotrebom putanje izračunate PHY algoritmom dok je ispunjen uslov $R_{\max} \leq R_{\max}^{\text{CRC}}$. PHY putanje su nezavisne od izbora glavnih putanja. Primetimo da se u zavisnosti od geografske pozicije čvorišta i topologije mreže, za određeni broj saobraćajnih zahteva rezervna PHY i glavna putanja mogu delimično ili u potpunosti preklapati. To ne ugrožava realizaciju ovih saobraćajih zahteva dokle god je ispunjen uslov $R_{\max} \leq R_{\max}^{\text{CRC}}$.

Modifikovani OSPF protokol usmeravanja koji pored glavnih putanja koristi PHY zaštitne putanje označen je sa OSPF-BP.

4.2. Opis predloženog novog protokola OSPF-BN

Slično kao za OSPF-BP i novi protokol OSPF-BN je zasnovan na standardnom OSPF protokolu sa metrikom $K/c(e)$, $e=1,\dots,E$, $K=\text{const}$ [RFC 2328], u kome se pored glavnih putanja koriste i rezervne putanje. Za izračunavanje glavnih putanja koristi se Dijkstra algoritam najkraće putanje. Kada su sve veze u mreži aktivne i imaju nominalni kapacitet, u tabelu usmeravanja su upisane glavne putanje za svaki par čvorišta (i,j) u mreži. Pored glavnih putanja izračunavaju se i rezervne putanje, tako da zahtevi za saobraćajem mogu biti raspodeljeni između dva toka: $x(i,j,1)$ za glavne putanje i $x(i,j,2)$ za rezervne putanje, $i=1,\dots,N$, $j=1,\dots,N$ and $i \neq j$. Raspoređivanje saobraćaja između glavne i rezervne putanje detaljno je opisano u poglavlju 4.4. Rezervne putanje se izračunavaju unapred, pre početka prenosa podataka po NOPHY algoritmu, koji ne uzima u obzir efekat na fizičkom sloju već samo omogućava da svaki saobraćajni zahtev bude realizovan preko dve putanje koje ne sadrže zajedničke veze.

Algoritam NOPHY sastoji se iz sledećih koraka:

1. Prvo se određuju glavne putanje upotrebom Dijkstra algoritma sa cenom $K/c(e)$, $e=1,...,E$, $K=const.$, kao u slučaju standardnog OSPF protokola.
2. Za svaki saobraćajni zahtev se određuje rezervna putanja na sledeći način:
U mreži se ukinu sve veze koje realizuju glavnu putanju za dati saobraćajni zahtev.
Dijkstra algoritmom se određuje najkraća putanja kroz modifikovanu mrežu.
To je NOPHY putanja za dati saobraćajni zahtev
3. Formira se zbirna tabela usmeravanja prema rezervnim putanjama dobijenim u koraku 2.

Izbor NOPHY rezervnih putanja zavisi od izbora glavne putanje. NOPHY algoritam garantuje realizaciju svakog saobraćajnog zahteva pomoću dve putanje koje ne sadrže zajedničke veze.

Modifikovani OSPF protokol usmeravanja koji pored glavnih putanja koristi NOPHY zaštitne putanje označen je sa OSPF-BN.

4.3. Referentni slučajevi

Prvi referentni slučaj sa kojim se porede performanse novih metoda za zaštitu saobraćaja, je standardni OSPF protokol sa cenom $K/c(e)$, $e=1,...,E$, $K=const$, [RFC 2328]. Cena veze se računa prema nominalnom kapacitetu veze i ne menja se bez obzira na redukciju kapaciteta zbog primenjenog postupka adaptivnog protoka, modulacije ili zaštitnog kodovanja. Promene stanja veza detektuju se ispitivanjem parametara uspostavljanja susedstva, što je objašnjeno u poglavlju 2. Nakon isteka intervala neaktivnosti veze proglašava se prekid veze, dok se posle prijema uzastopne sekvence

od četiri paketa najave menja stanje veze iz stanja prekida u ispravno stanje. Vreme reakcije T_r u ovom referentnom slučaju iznosi 40s.

Drugi referentni slučaj OSPF-C, je protokol u kome se preusmeravanje vrši nakon svake promene kapaciteta veze, pri čemu je cena usklađena sa trenutnom vrednošću kapaciteta veze. Kapaciteti veza se menjaju skokovito nakon reakcije mehanizma adaptivnog protoka, modulacije ili zaštitnog kodovanja kao posledica promene nivoa prijemnog signala u radio relejnom uređaju izazvanog slabljenjem usled kiše. Na primer, kapaciteti se menjaju sa 1Gbit/s na 100Mbit/s, zatim na 10Mbit/s, a daljim smanjenjem nivoa prijemnog signala dolazi do prekida veze. Smatra se da je detekcija promene kapaciteta trenutna, te je vreme reakcije protokola usmeravanja $T_r=1s$. Iako bi opisana reakcija bila idealna, u praksi bi se mogle dogoditi nestabilnost i gubitak saobraćaja zbog velikog broja zahteva za preusmeravanjem.

4.4. Raspoređivanje saobraćaja između putanja

U ovom delu su opisani načini raspoređivanja saobraćaja između više putanja. Novi predloženi protokoli OSPF-BP i OSPF-BN usmeravaju saobraćaj po glavnoj i rezervnoj putanji između kojih se saobraćaj raspoređuje prema izabranom algortimu. Za referentne slučajeve OSPF i OSPF-C, saobraćaj se raspoređuje samo u slučaju da postoji više najkraćih putanja iste cene koje su ravnopravne sa stanovišta izbora glavne putanje. U slučaju da postoji više putanja jednake cene tzv. ECMP (engl. *Equal Cost Multi Path*), saobraćajni zahtev se može realizovati preko jedne od njih ili deljenjem saobraćajnog zahteva na tokove preko ovih putanja [Pioro 04]. Način raspoređivanja saobraćaja na tokove može imati uticaja na performanse mreže.

U literaturi [Retana 99] se preporučuje raspoređivanje saobraćaja (engl. *load balancing*) između putanja jednake cene (tada je broj tokova koji opslužuju zahtev $h(i,j)$, $N_k(i,j)$ jednak je broju putanja između čvorova i,j koji imaju jednake cene, $N_r(i,j)$). Na taj način se postiže dvostruko poboljšanje: smanjenje opterećenja u mreži i povećanje maksimalnog protoka koji je moguće postići za ostvarenje jednog

saobraćajnog zahteva kad su ostali saobraćajni zahtevi jednaki nuli. U [Pioro 04] je urađena detaljna analiza slučajeva optimizacije raspodele saobraćaja u mrežama u kojima se javlja ECMP, pri čemu se ne uzimaju u obzir eventualni prekidi u pojedinim vezama, već se smatra da veze funkcionišu sa nominalnim kapacitetom. Obzirom da je cilj ovog rada analiza performansi mreže u prisustvu prekida izazvanih kišom i da su definisani kriterijumi za ocenu performansi u mreži, u daljoj analizi razmatraju se tri načina raspoređivanja. Za kriterijume opterećenja veza i maksimalnog protoka dodeljenog pojedinačnom saobraćajnom zahtevu to su ravnomerno i iterativno raspoređivanje, a za kriterijum maksimizacije proporcionalno fer raspodeljenog kapaciteta veza to je proporcionalno fer raspodeljivanje saobraćaja. U poglavljima 4.4.1, 4.4.2 i 4.4.3. detaljno su opisani načini raspoređivanja saobraćaja i njihove karakteristike.

4.4.1. Ravnomerno raspoređivanje saobraćaja

Ravnomerno raspoređivanje saobraćaja (engl. *even load balancing*) podrazumeva da se pri opsluživanju saobraćajnog zahteva $h(i,j)$ saobraćaj ravnomerno deli između svih tokova $x(i,j,k)$ koji se koriste za njegovu realizaciju. U skladu sa tim, koeficijenti ravnomernog raspoređivanja saobraćaja $b(i,j,k)|_{\text{ravnomerno}}$ između čvorišta i i j preko toka $x(i,j,k)$ definisani su izrazom:

$$b(i,j,k)|_{\text{ravnomerno}} = 1 / N_k(i,j), i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N, k = 1, \dots, N_k(i,j) \quad (4-1)$$

gde je $N_k(i,j)$ - broj tokova koji opslužuju zahtev $h(i,j)$.

Nedostatak ovog načina raspoređivanja je u tome što se koeficijenti izračunavaju samo na osnovu broja tokova koji opslužuju dati saobraćajni zahtev, bez uzimanja u obzir ostalih saobraćajnih zahteva u mreži. Zbog toga može nastati neravnomerno opterećenje veza u mreži. Glavna prednost ravnomernog raspoređivanja je jednostavnost implementacije.

Ovaj način raspoređivanja se označava dodavanjem slova E iza imena protokola.

Ravnomerno raspoređivanje se koristi u OSPF protokolu u slučaju da postoje putanje sa jednakom cenom [RFC 2328]. Ovaj slučaj predstavlja donji granični slučaj kada bi se mreža realizovala sa opremom na kojoj nisu izvršene modifikacije, sa podrazumevanim vrednostima parametara OSPF protokola i njegova oznaka je OSPF-E.

4.4.2. *Iterativno raspoređivanje saobraćaja*

Iterativno raspoređivanje saobraćaja (engl. *iterative load balancing*) je novi predloženi način raspoređivanja saobraćaja. Cilj iterativnog raspoređivanja je otklanjanje nedostatka ravnomernog raspoređivanja, a to je neravnomerno opterećenje veza u mreži.

Iterativno raspoređivanje saobraćaja vrši se po sledećem algoritmu:

1. U prvoj iteraciji svim tokovima se dodeljuju koeficijenti ravnomernog raspoređivanja:

$$b(i, j, k) \Big|_{iteracija1} = 1 / N_k(i, j), i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N \quad (4-2)$$

2. Za date koeficijente raspoređivanja određuje se vektor normalizovanih opterećenja veza **L** prema izrazu (3-10).
3. Računaju se normalizovana opterećenja putanja $L_r(i, j, k)$ kao suma normalizovanih opterećenja $L(e)$ svih veza koje je realizuju:

$$L_r(i, j, k) = \sum_{e=1}^E \delta(i, j, k, e) \cdot L(e), \quad (4-3)$$

$$i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N, k = 1, \dots, N_k(i, j)$$

4. Računaju se novi koeficijenti raspoređivanja sa ciljem da se više podataka šalje preko putanje koja je manje opterećena. To se postiže tako što su koeficijenti raspoređivanja inverzno proporcionalni opterećenju putanje. Da bi zbir koeficijenata bio jednak jedinici vrši se odgovarajuća normalizacija:

$$b(i, j, k) \Big|_{iteracijaN} = \frac{1 / L_r(i, j, k)}{\sum_{m=1}^{N_k} 1 / L_r(i, j, m)}, \quad (4-4)$$

$$i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N, k = 1, \dots, N_k(i, j)$$

5. Ukoliko se novi koeficijenti razlikuju od koeficijenata dobijenih u prethodnoj iteraciji više od dozvoljene tolerancije prelazi se ponovo na korak 2, ukoliko ne, napušta se iterativni postupak. Za praktičnu primenu dovoljno je pretpostaviti da odstupanje pojedinačnih koeficijenata između dve iteracije bude manje od 1%.

Ovako definisan postupak brzo konvergira ka nepokretnim tačkama koeficijenata raspoređivanja. Čak iako prvi korak počne od bilo koje slučajne vrednosti koeficijenata raspoređivanja, a ne samo od ravnomerne raspodele, već posle dve do tri iteracije dobija se nepokretna tačka.

Proračun koeficijenata iterativnog raspoređivanja saobraćaja se periodično ponavlja, sa periodom ponavljanja jednakom $T_{ip} = 1s$. Kako se promena odnosi na koeficiente raspoređivanja saobraćaja po glavnoj i rezervnoj putanji, a te putanje se ne menjaju, promena ne može dovesti do nestabilnosti i gubitka saobraćaja kao u slučaju preusmeravanja tj. ponovnog izračunavanja putanja.

Obzirom da periodičnim promenama koeficijenata prati opterećenja veza, iterativni algoritam raspoređivanja ima značajno svojstvo da ukoliko se na nekoj od putanja nalazi veza u prekidu, toj putanji će biti dodeljen koeficijent raspoređivanja jednak nuli, budući da je njeno opterećenje beskonačno veliko. Na taj način ovaj algoritam praktično vrši i zaštitu saobraćaja u slučaju prekida veze. Zbog toga se ovaj način raspoređivanja saobraćaja primenjuje u slučajevima kada se saobraćaj usmerava po glavnoj i rezervnoj putanji.

Protokoli sa iterativnim raspoređivanjem u oznaci imaju dodato slovo I iza imena protokola. U predloženim protokolima za zaštitu saobraćaja koristi se iterativno raspoređivanje saobraćaja između glavne i rezervne putanje. Ovi slučajevi označeni su sa OSPF-BPI i OSPF-BNI. Kako iterativni način raspoređivanja saobraćaja daje bolje rezultate prema kriterijumima opterećenja veza i maksimalnog protoka dodeljenog pojedinačnom saobraćajnom zahtevu, korišćen je i za drugi referentni slučaj u kome je oznaka OSPF-CI, gde se raspoređivanje vrši po glavnim putanjama jednake metrike.

4.4.3. Proporcionalno fer raspoređivanje saobraćaja

Pri analizi performansi mreže po kriterijumu maksimizacije proporcionalno fer raspodeljenog kapaciteta veza u mreži, maksimalna vrednost kriterijumske funkcije $F_{\max}$ se dobija kada se prema algoritmu maksimizacije (definisani u izrazima (3-5), (3-6)) varira saobraćaj dodeljen pojedinim tokovima $x(i,j,k)$. Vrednosti toka dobijene algoritmom maksimizacije su $x(i,j,k)|_{F_{\max}}$. Koeficijenti raspoređivanja za proporcionalno fer raspoređivanje saobraćaja se mogu izračunati zamenom ove vrednosti u izraz kojim se definišu koeficijenti usmeravanja $b(i,j,k)$ datom u (3-7):

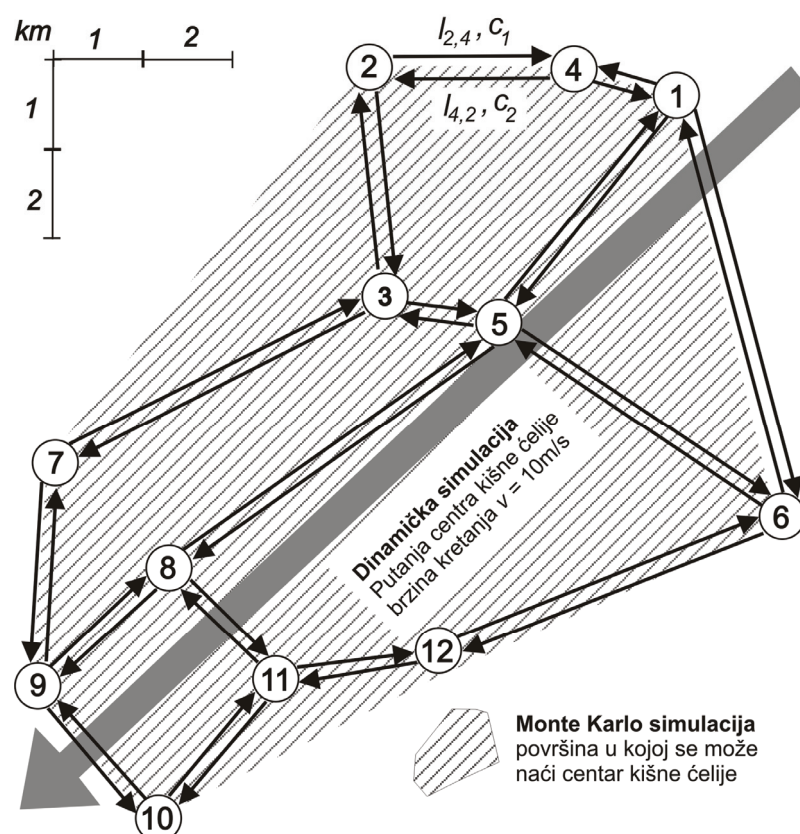
$$b(i,j,k)|_{F_{\max}} = \frac{x(i,j,k)|_{F_{\max}}}{\sum_{k=1}^{N_k(i,j)} x(i,j,k)|_{F_{\max}}} \quad (4-5)$$

Kao što je objašnjeno u poglavlju 3.2., kriterijum maksimizacije proporcionalno fer raspodeljenog kapaciteta veza u mreži predstavlja samo graničan slučaj koji pruža uvid u maksimalne mogućnosti mreže u prisustvu kišne ćelije da u datom trenutku da ostvari fer raspodelu saobraćaja.

Ovaj način raspoređivanja je primenjen pri analizi performansi mreže po kriterijumu maksimizacije proporcionalno fer raspodeljenog kapaciteta veza u mreži i odgovarajući protokoli su označeni dodavanjem oznake F iza naziva protokola, kao OSPF-F, OSPF-BPF, OSPF-BNF i OSPF-CF.

5. ANALIZA PERFORMANSI NA TEST MREŽI

Analiza i proračun performansi predloženih metoda izvršene su za test mrežu sa topologijom prikazanoj na Sl. 5-1. Mreža se sastoji od $N=12$ čvorišta, koja su povezana sa $E=32$ unidirekcionih veza (16 bidirekcionih veza) i pokriva geografsku površinu oko 7 x 7 km. Prema usvojenoj pretpostavci da svako čvorište komunicira sa svakim u ovoj mreži postoje ukupno 132 saobraćajna zahteva koja treba opslužiti.



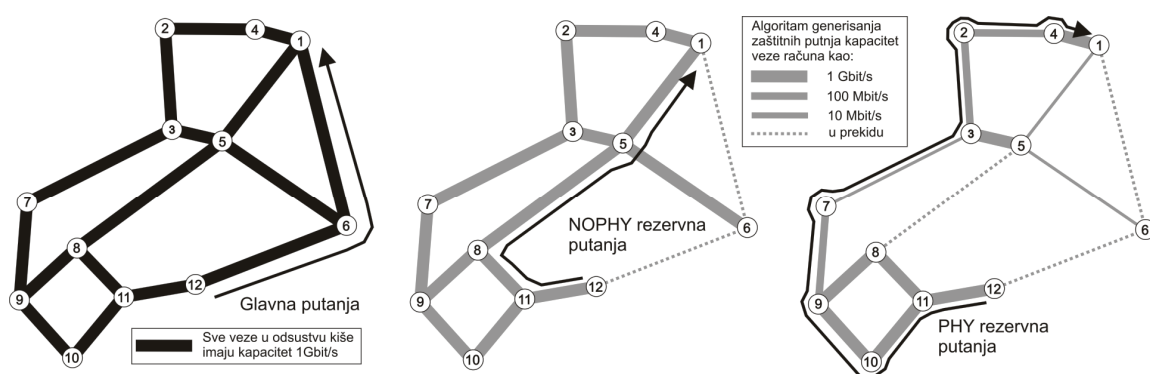
Sl. 5-1. Topologija mreže, pravac i smer kretanja kišne ćelije

Karakteristike uređaja izabrane su prema ETSI standardima za ovaj frekventijski opseg [TS 102 524]. Jedan od bitnih zahteva ETSI standarda, koji se razlikuje od standarda na nižim frekventijskim opsezima je da je definisana minimalna efektivno

izračena snaga u odnosu na izotropni radijator EIRP (engl. *Effective Isotropic Radiator Power*), kako bi se što više potisnuli bočni snopovi (engl. *side lobes*) [EN 302 217] i omogućilo što češće ponavljanje istog kanala bez opasnosti od interferencije. Imajući navedene standarde u vidu, usvojeno je da predajna snaga p_{Tx} iznosi 15dBm, dobici antena G_{Tx} i G_{Rx} su 46dBi.

Kao što je u prvom poglavlju napomenuto, da bi se smanjio uticaj slabljenja usled kiše primenjuju se uređaji sa adaptivnom modulacijom, protokom i/ili zaštitnim kodovanjem koji omogućavaju kompromis između kapaciteta i pragova prijema. Pošto su promene propagacijskih uslova nagle, da bi se izbegle stalne varijacije, pretpostavljene su skokovite promene protoka od 1Gbit/s, 100Mbit/s i 10Mbit/s, kojima odgovaraju pragovi prijema n_{RT} od -59dBm, -72dBm i -88dBm respektivno. Pretpostavlja se da centralna frekvencija f iznosi 80GHz i da je upotrebljena vertikalna polarizacija, te je na osnovu ovih podataka formiran model veze na način opisan u poglavlju 2.4.

Na osnovu algoritma opisanog u poglavlju 4. za svaki saobraćajni zahtev generisane su glavna putanja, PHY i NOPHY rezervne putanje. Na Sl. 5-2. prikazan je primer generisanja putanja između čvorišta 12 i 1.



Sl. 5-2. Primer generisanja zaštitnih putanja za saobraćajnih zahtev između dva usmerivača (12 i 1)

Sve veze u odsustvu kiše imaju kapacitet 1Gbit/s, te je najkraća putanja prema metrici proporcionalnoj recipročnoj vrednosti kapaciteta veze preko rutera: 12-6-1. Ova putanja je glavna putanja.

Prema opisu NOPHY algoritma u 4.1., rezervna putanja se dobija kao rezultat Dijkstra algoritma u mreži u kojoj su prekinute sve veze koje pripadaju glavnoj putanji. Nova najkraća putanja je 12-11-8-5-1 i to je NOPHY rezervna putanja.

Pri određivanju PHY putanja, na osnovu [Bonati 99] pretpostavljena je obrnuta proporcionalnost maksimalnog intenziteta kiše u centru kišne ćelije $R_{\max}$ i granice kišne ćelije ρ prikazana u Tab. 1. Koristeći date parove parametara izvršena je deo po deo linearna aproksimacija $R_{\max}$ i ρ , kako bi se dobile vrednosti parametara koje nisu sadržane u tabeli.

Tab. 1. *Pretpostavljena inverzna proporcionalnost $R_{\max}$ i ρ*

$R_{\max}(\text{mm/h})$	< 20	20	30	40	50	60	>60
ρ (km)	5	5	3.5	2.5	1.8	1.2	1.2

Prema postupku za formiranje PHY rezervnih putanja opisanom u 4.1. utvrđeno je da su parametri kritične kišne ćelije pri kojima dolazi do prekida povezanosti grafa mreže maksimalni intenzitet kiše u centru kritične kišne ćelije $R_{\max}^{\text{CRC}}=40\text{mm/h}$ i odgovarajući poluprečnik $\rho^{\text{CRC}}=2.5$ km (prema Tab.1.). U mreži na Sl. 5-2. kišna ćelija većeg intenziteta kiše od $R_{\max}^{\text{CRC}}$ izazvala bi izolaciju čvorišta broj 6 od ostatka mreže.

Na osnovu ovih vrednosti, za svaku vezu u mreži izračunat je kapacitet veze za slučaj kada se kišna ćelija intenziteta $R_{\max}^{\text{CRC}}$ pozicionira na sredinu te veze. Ovakva kišna ćelija ne smanjuje kapacitet veza između čvorišta 8-9, 8-11, 9-10, 10-11 i 11-12, dok veze 2-3, 2-4 i 7-9 imaju kapacitet od 100Mbit/s, veze 1-5, 5-6, 3-7 imaju kapacitet 10Mbit/s, a veze 1-6, 5-8 i 6-12 su u prekidu. Za ovako usvojene kapacitete veza izračunata je najkraća putanja 12-11-10-9-7-3-2-4-1 i ova putanja predstavlja PHY rezervnu putanju za saobraćajni zahtev 12-1.

U 53.1% saobraćajnih zahteva, PHY algoritam daje zaštitnu putanju koja je ista kao i glavna putanja. Jedan deo te grupe čine saobraćajni zahtevi koji se ostvaruju

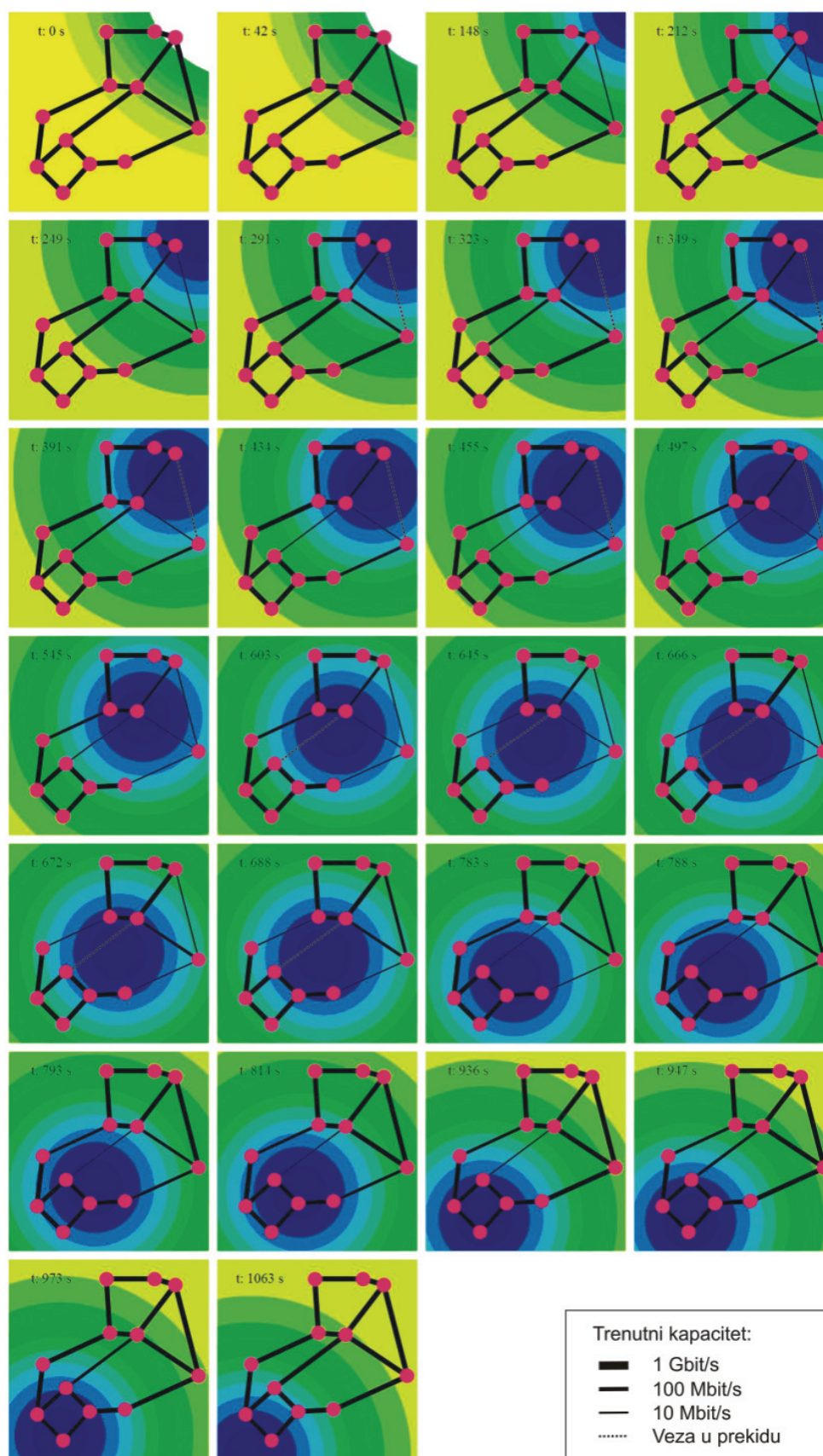
isključivo preko kratkih veza čiji se stanje i kapacitet ne menjaju pod dejstvom kišne ćelije intenziteta manjeg od $R_{\max}^{\text{CRC}}$, kao što su na primer saobraćajni zahtevi između čvorišta 8, 9, 10, 11 i 12. Drugi deo potiče od konkretne topologije mreže, prema kojoj bez obzira na redukciju kapaciteta pojedinih veza, najkraći put ostaje nepromenjen, kao što je na primer slučaj sa saobraćajnim zahtevom između čvorišta 5 i 2 koji se i u glavnoj i u PHY zaštitnoj putanji ostvaruje kao 5-3-2 ili na primer 6 i 3 koji se u oba slučaja ostvaruje kao 6-5-3.

Napomenimo da u opisanoj mreži PHY i NOPHY algoritmi daju iste zaštitne putanje u 22.1% slučajeva, koje ne sadrže ni jednu vezu koja pripada glavnoj putanji. Dati procenat nije visok, te se očekuje razlika u performansama PHY i NOPHY algoritma.

Za opisanu mrežu primenjene su dve vrste analize: dinamička i statistička.

U dinamičkoj analizi prati se reakcija protokola usmeravanja na promenu parametara kišne ćelije (pravca, smera i intenziteta brzine kretanja) i računa se promena kriterijuma za ocenu performansi u mreži. Pretpostavlja se da se kišna ćelija velikog intenziteta ($R_{\max}=40\text{mm/h}$, $\rho=2.5\text{km}$) pomera, nošena vetrom brzine 10m/s , u smeru prikazanom na Sl. 5-1. Kao posledica javlja se 26 promena stanja veze: četiri su promene stanja aktivna/prekinuta (engl. *up/down*), dok su ostale promene kapaciteta, što je prikazano na Sl. 5-3.

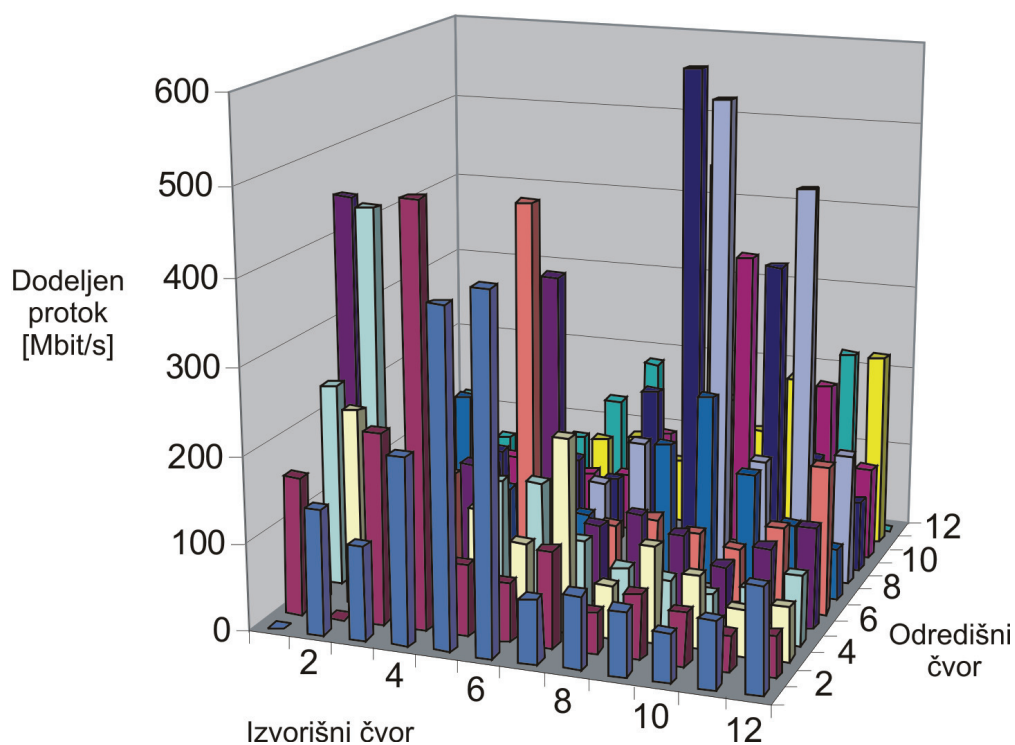
Statistička simulacija je Monte-Karlo tipa u kojoj se na slučajan način u mreži pozicionira centar kišne ćelije i zatim na osnovu stanja veza koje odgovaraju kišnoj ćeliji izračunaju vrednosti kriterijuma za ocenu performansi. Ovakvi eksperimenti se ponavljaju za 200 različitih pozicija centra kišne ćelije i rezultati kriterijuma za ocenu performansi se prikazuju u obliku kumulativne funkcije raspodele CDF (engl. *Cumulative Distribution Function*). Numerički rezultati dati su za dva tipa kišnih ćelija: kišne ćelije sa umerenim intenzitetom kiše ($R_{\max}=20\text{mm/h}$, $\rho=5\text{km}$) i sa velikim intenzitetom kiše ($R_{\max}=40\text{mm/h}$, $\rho=2.5\text{km}$).



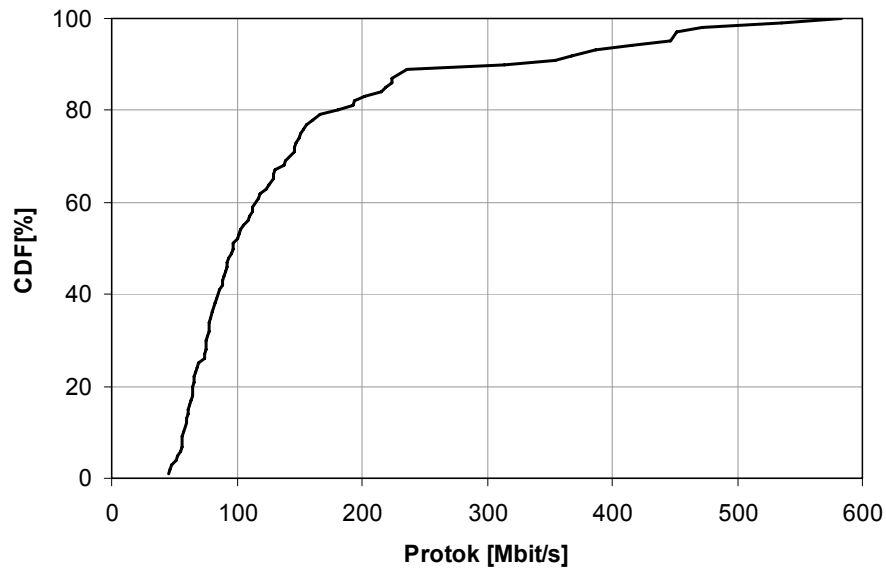
Sl. 5-3. Promene u mreži uzrokovane pomeranjem kišne ćelije

5.1. Performanse prema kriterijumu proporcionalno fer raspodele kapaciteta veza u mreži

Raspodela protoka prema kriterijumu maksimizacije proporcionalno fer raspodeljenog kapaciteta veza u mreži za referentni slučaj bez uticaja kišne ćelije, kada sve veze u mreži imaju nominalni kapacitet 1Gbit/s, prikazan je na Sl. 5-4. Kumulativna funkcija raspodele CDF dodeljenih protoka za referentni slučaj prikazana je na Sl. 5-5. Uočava se da je odnos maksimalno i minimalno dodeljenog protoka oko 10, međutim da u oko 80% zahteva odnos od 1:2 do 2:1 u odnosu na medijalnu vrednost, koja u konkretnom slučaju iznosi 96.6Mbit/s. Na taj način je ostvarena osnovna postavka proporcionalne fer raspodele, a to je da se izbegavaju dodele nultog i previše velikog protoka [Pioro 04].



Sl. 5-4. Dodeljeni protoci prema proporcionalno fer raspodeli u odustvu kišne ćelije

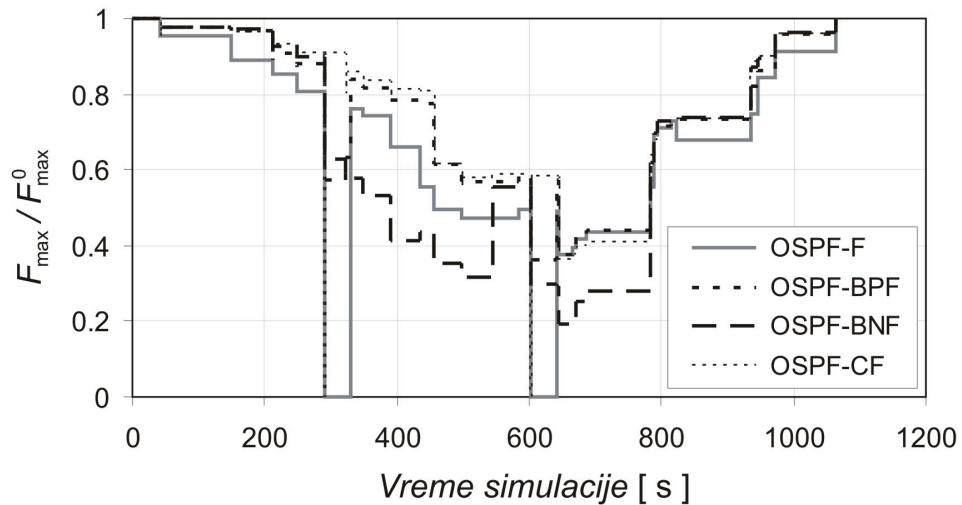


Sl. 5-5. CDF dodeljenih protoka prema proporcionalno fer raspodeli u odustvu kišne ćelije

5.1.1. Rezultati dinamičke analize

Prema postupku izračunavanja kriterijuma maksimizacije proporcionalno fer raspodeljenog kapaciteta veza u mreži opisanog u poglavlju 3.2. izračunata je vrednost funkcije $F_{\max}$ za slučaj bez uticaja kišne ćelije, kada sve veze u mreži imaju nominalni kapacitet od 1Gbit/s. Ova referentna vrednost je označena sa $F_{\max}^0$. U cilju jednostavnijeg praćenja dobijenih rezultata izvršena je normalizacija dobijenih rezultata u odnosu na referentnu vrednost $F_{\max}^0$.

Na Sl. 5-6. prikazana je promena $F_{\max} / F_{\max}^0$ u vremenu izazvana kretanjem kišne velikog intenziteta ($R_{\max}=40\text{mm/h}$, $\rho=2.5\text{km}$), nošene vetrom brzine 10m/s ćelije za protokole: OSPF-F, OSPF-BPF, OSPF-BNF i OSPF-CF.



Sl. 5-6. Promena kriterijumske funkcije $F_{\max}$ pri kretanju kišne ćelije

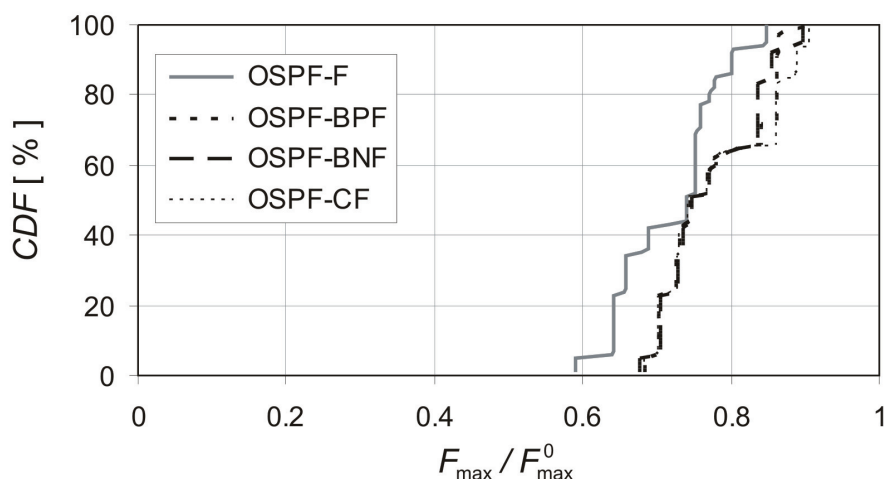
Na Sl. 5-6 se vidi da je vrednost kriterijumske funkcije za OSPF-BPF sa rezervnim putanjama generisanim na osnovu informacija o fizičkom sloju, vrlo bliska vrednostima u slučaju referentnog slučaja OSPF-CF, sve dok se prva veza ne prekine u trenutku $t=291$ s. Posle tog trenutka vrednost kriterijumske funkcije $F_{\max}$ za OSPF-F je minus beskonačno, zbog postojanja saobraćajnog zahteva koji ne može da se realizuje, dok je za OSPF-BPF $F_{\max}$ konačno jer se saobraćajni zahev realizuje preko rezervne putanje. Posle vremena reakcije $T_r=40$ s, OSPF-F protokol vrši preusmeravanje i $F_{\max}$ je ponovo konačno. Još jedan prekid koji se javlja u $t=603$ s izaziva sličnu reakciju ovih protokola.

Vrednost kriterijumske funkcije u slučaju OSPF-BNF je manja od OSPF-BPF, ali i u ovom slučaju $F_{\max}$ ostaje konačno, što je bolji rezultat od OSPF-F.

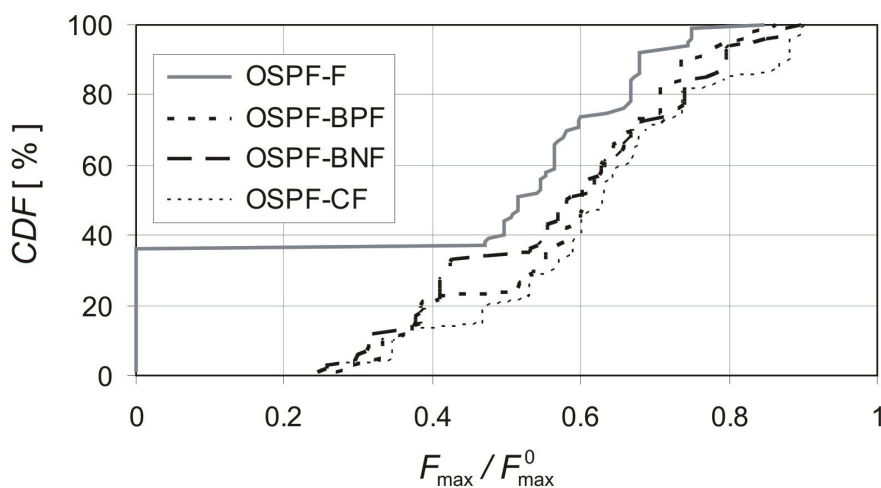
5.1.2. Rezultati statističke analize

Obzirom da se smer i brzina vetra menjaju u vremenu, izvršena je statistička simulacija sa centrima kišne ćelije uniformno raspoređenim unutar mreže. Ova analiza ispituje reakciju mreže nekoliko sekundi posle promena u kojima OSPF-F, OSPF-BPF i OSPF-BNF ne mogu da izvrše preusmeravanje jer je njihovo vreme reakcije T_r veliko, a OSPF-CF može.

Rezultati statističke simulacije za kišu umerenog intenziteta prikazani su na Sl. 5-7, a za kišu velikog intenziteta prikazani su na Sl. 5-8.



Sl. 5-7. CDF normalizovane funkcije $F_{\max}/F_{\max}^0$ za slučaj umerene kiše
 $R_{\max}=20\text{mm/h}$, $\rho=5\text{km}$



Sl. 5-8. CDF normalizovane funkcije $F_{\max}/F_{\max}^0$ za slučaj jake kiše
 $R_{\max}=40\text{mm/h}$, $\rho=2.5\text{km}$

Rezultati statističke simulacije pokazuju da za umeren intenzitet kiše u kišnoj ćeliji, protokol OSPF-BPF ima performanse vrlo bliske OSPF-CF. Protokol OSPF-BNF ima malo lošije performanse, ali značajno bolje od OSPF-F. Za velike

intenzitete kiše razlika je uočljivija, a protokol OSPF-BPF ima bolje rezultate od OSPF-BNF.

5.2. Performanse prema kriterijumu opterećenja veza

Kriterijum opterećenja veze ima jasnu fizičku interpretaciju kao broj putanja po jedinici kapaciteta. Za ocenu performansi mreže koriste se funkcije maksimalnog i srednjeg opterećenja veza, definisane u poglavlju 3.3. Slučaj kada je opterećenje beskonačno ima tumačenje u događaju koji nastaje kada je vezi dodeljen saobraćajni zahtev a njen kapacitet iznosi nula, pa zahtev ne može da bude opslužen.

Dobijeni rezultati ove analize zavise kako od odabranog postupka usmeravanja saobraćaja tako i od načina raspoređivanja saobraćaja. Kao što je napomenuto u poglavlju 4.3., u analizi se razmatraju protokoli sa iterativnim raspoređivanjem OSPF-CI, OSPF-BPI, OSPF-BNI i referentni slučaj sa ravnomernim raspoređivanjem OSPF-E.

U Tab. 2. prikazane su referentne vrednosti parametara opterećenja u odsustvu kišne ćelije, kada sve veze rade punim kapacitetom 1Gbit/s.

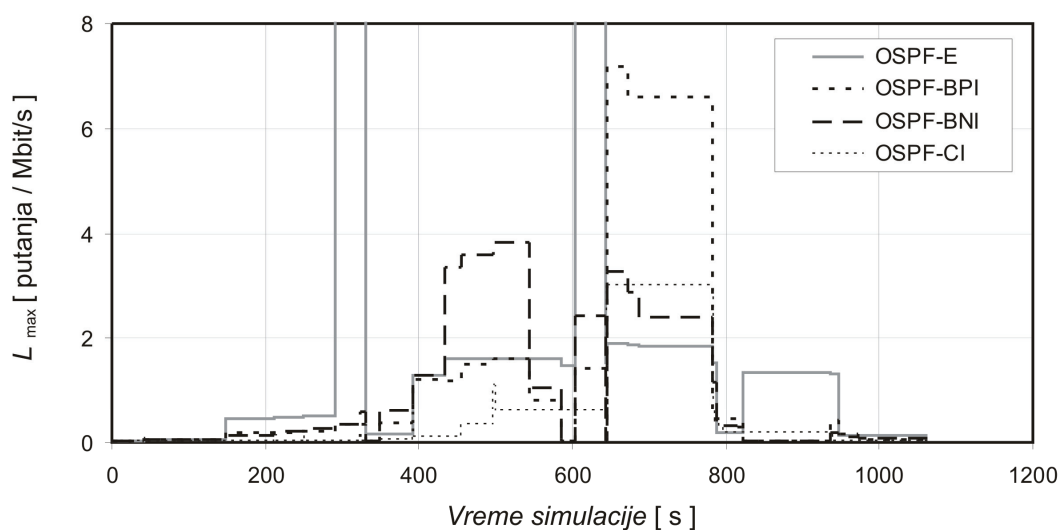
Tab. 2. Parametri opterećenja mreže u odsustvu kiše

Način usmeravanja	OSPF-E	OSPF-CI	OSPF-BNI	OSPF-BPI
Procenat saobraćanih zahteva sa višestrukim putanjama	19.6%	19.6%	100%	46.9%
$L_{\max}$ [putanja / Mbit/s]	0.0157	0.0154	0.0170	0.0179
L_{ave} [putanja / Mbit/s]	0.0094	0.0094	0.0115	0.0104

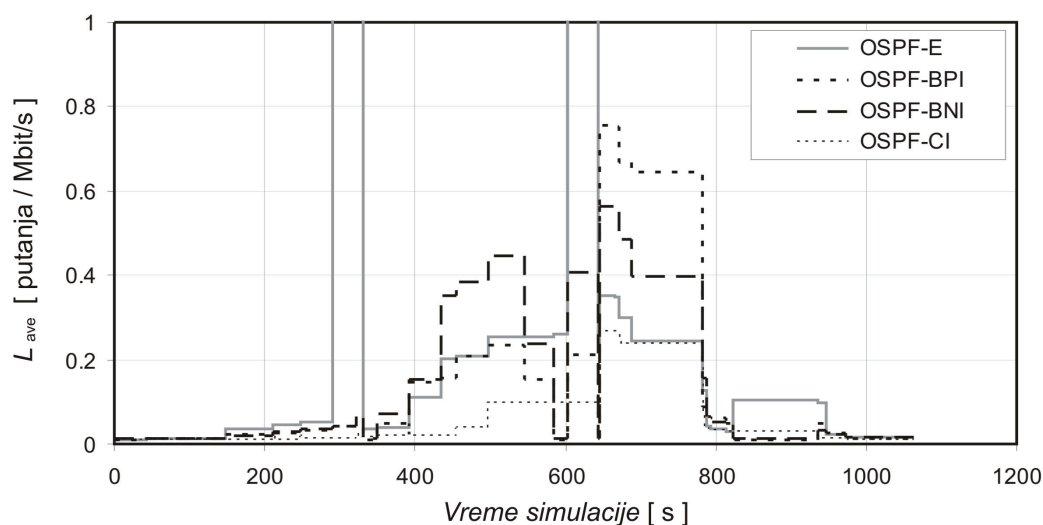
Uočava se da u odsustvu kišne ćelije razlika između referentnih slučajeva OSPF-E i OSPF-CI potiče samo od različitih načina raspoređivanja i ta razlika je ispod 1%. Protokoli OSPF-BNI i OSPF-BPI daju nešto lošije rezultate u odnosu na referentne slučajeve. Takav rezultat se dobija zbog slučajeva kada rezervne putanje sadrže veći broj veza od glavne, pa se ukupno opterećenje mreže povećava. Ovo povećanje iznosi oko 10%.

5.2.1. Rezultati dinamičke analize

Na Sl. 5-9. i Sl. 5-10. predstavljene su promene parametara opterećenja $L_{\max}$ i L_{ave} u vremenu izazvane kretanjem kišne ćelije velikog intenziteta ($R_{\max}=40\text{mm/h}$, $\rho=2.5\text{km}$), nošene vetrom brzine 10m/s ćelije za protokole: OSPF-E, OSPF-BPI, OSPF-BNI i OSPF-CI.



Sl. 5-9. Promena parametra opterećenja mreže $L_{\max}$ pri kretanju kišne ćelije



Sl. 5-10. Promena parametra opterećenja mreže L_{ave} pri kretanju kišne ćelije

U slučaju OSPF-E u trenutku $t=291s$, kada dolazi do prekida veze i do nerealizovanih saobraćajnih zahteva. Vrednost obe kriterijumske funkcije postaje beskonačna, a posle preusmeravanja sa novom topologijom i nominalnim kapacitetima veza u $t=331s$, postaju ponovo konačne. Sledeći trenutak kada dolazi do prekida veze je $t=603s$. Ponovo vrednosti obe funkcije postaju beskonačne, a nakon preusmeravanja dobijaju konačnu vrednost. Opterećenje se smanjuje kada kišna ćelija napušta oblast iznad mrežnog grafa.

Za slučaj OSPF-CI vrednosti L_{max} i L_{ave} su uvek konačne. Međutim, na prvi pogled je neočekivana pojava da u periodu od 645s do 783s OSPF-E daje bolje rezultate nego OSPF-CI. U trenutku $t=645s$, na Sl. 5-3. se vidi da kišna ćelija uzrokuje neraspoloživost veze između čvorišta 5 i 8 i smanjenje kapaciteta veza između čvorišta: 1 i 6, 5 i 6 i 6 i 12 na 10Mbit/s i kapacitet veze između čvorišta 3 i 7 se takođe smanjuje sa 100Mbit/s na 10Mbit/s. Mreža se tada sastoji od dve grupe čvorišta u kojima kapaciteti veza iznose 1Gbit/s, a veze između grupa su manjeg kapaciteta. Prvu grupu čine čvorišta: 2, 4, 1, 5 i 3, a drugu čvorišta: 7, 8, 9, 10, 11 i 12. Prema OSPF-CI algoritmu saobraćaj između ove dve grupe čvorišta se dominantno usmerava na vezu između čvorišta 3 i 7 koja ima L_{max} . Za razliku od OSPF-CI, protokol OSPF-E, koji koristi podrazumevane metrike od $K/(1000Mbit/s)$ za sve veze, usmerava deo saobraćaja preko veze između čvorišta 6 i 12 (i dalje preko

6-5 i 6-1) što rasterećuje vezu 3-7 i ukupni $L_{\max}$ je manji. Međutim, prosečno opterećenje veza L_{ave} je manje kod OSPF-CI nego kod OSPF-E protokola, jer u tom parametru utiče i opterećenje veze manjeg kapaciteta između čvorišta 6 i 12 koja preuzima deo tokova koji opslužuju saobraćajne zahteve između čvorišta 6 i grupe čvorišta 8, 9, 10, 11 i 12. Kad kišna ćelija napusti ovaj prostor u trenutku 783s dolazi do povećanja kapaciteta veze 7-3 na 100MBit/s i ponovnog uspostavljanja veze 8-5 sa malim kapacitetom 10Mbit/s na šta OSPF-CI reaguje rasterećivanjem veze 7-3. Povećanjem kapaciteta veze 12-6 na 100MBit/s u trenutku $t=788s$, $L_{\max}$ se kod OSPF-CI drastično smanjuje. U slučaju OSPF-E, kada se ponovo uspostavi veza 5-8 u trenutku $t=823s$, nakon vremena reakcije $T_r=40s$ izvršeno je preusmeravanje sa podrazumevanim metrikama koje ne odgovaraju trenutnim kapacitetima veza, što je dovelo do smanjenja $L_{\max}$ i pogošanja performansi. Dakle, u ovom slučaju se pokazalo da usmeravanje po najkraćim putanjama ne daje uvek optimalni rezultat u pogledu opterećenja veza što je detaljno opisano u [Pioro 04].

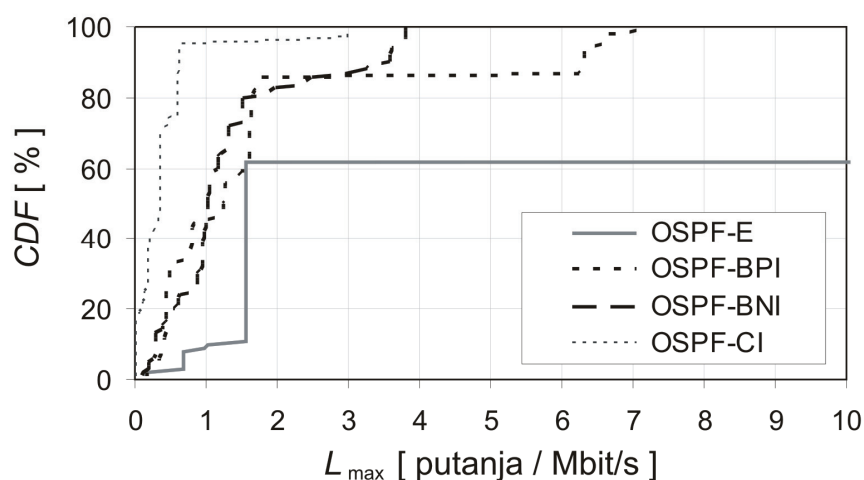
Za razliku od OSPF-E prema protokolu OSPF-BNI, u trenucima prekida veza, nastavlja se realizacija saobraćajnih zahteva jer glavna i rezervna putanja nisu istovremeno pod uticajem kišne ćelije. Ostvarene performanse u pogledu opterećenja nisu uvek između dva referentna slučaja, odnosno kada se kišna ćelija nalazi u prostoru oko centra mreže u značajnom procentu vremena performanse OSPF-BNI su lošije od oba referentna algoritma. Na početku kišnog događaja kada je manji broj veza zahvaćen uticajem kišne ćelije, L_{ave} i $L_{\max}$ imaju manje vrednosti nego u slučaju OSPF-E algoritma i očekivano su veće od rezultata OSPF-CI protokola. Kasnije, posle oporavka OSPF-CE preusmeravanjem, performanse protokola OSPF-BNI su lošije od oba referentna slučaja u većem delu vremena. Na kraju kišnog događaja performanse se popravljaju i bolje su nego u slučaju OSPF-E protokola. Razlog za ovakav tok nalazi se u činjenici da je broj veza koje učestvuju u formiranju zaštitne putanje u OSPF-BNI po pravilu veći nego u glavnoj putanji, te je veći veza broj izložen opterećenju nego što je u slučaju OSPF-CI i u odgovarajućem procentu vremena OSPF-E protokola koji raspoređuju saobraćaj samo po najkraćim putanjama.

Kao i u slučaju OSPF-BNI i OSPF-BPI protokol ostvaruje sve saobraćajne zahteve u trenucima kada se dešavaju prekidi veza za razliku od OSPF-E protokola.

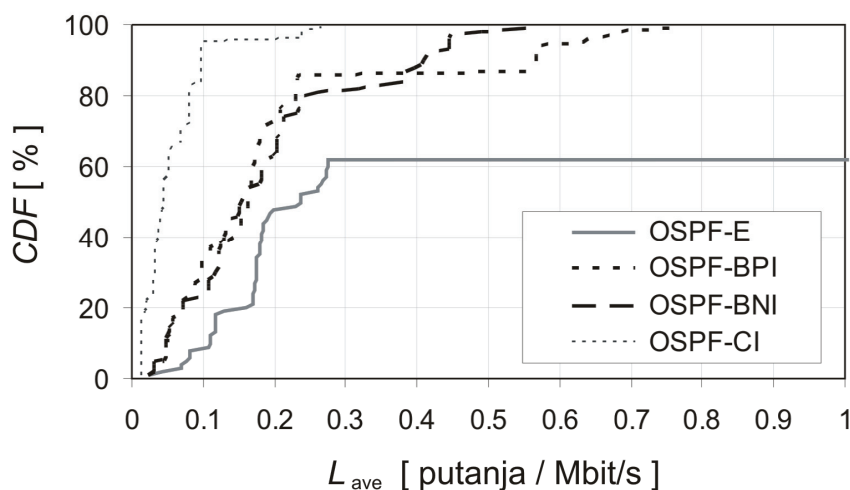
Međutim, performanse protokola OSPF-BPI su u većem delu vremena kišnog događaja bolje od OSPF-E protokola do kritičnog trenutka $t=642s$. Slično kao kod OSPF-CI protokola opisana pojava između $t=642s$ i $t=783s$ značajno degradira performanse protokola OSPF-BPI i to u ovom slučaju ne samo u pogledu maksimalnog opterećenja L_{max} , već i srednjeg opterećenja L_{ave} . Ipak, bez obzira na datu činjenicu, može se zaključiti da su performanse protokola OSPF-BPI po pravilu bolje od protokola OSPF-BNI u pogledu opterećenja.

5.2.2. Rezultati statističke analize

Rezultati statističke analize prema kriterijumu za ocenu performansi baziranom na opterećenju veza, prikazane su na Sl. 5-11. - Sl. 5-14. Predstavljena je kumulativna funkcija raspodele (CDF) maksimalnog i srednjeg opterećenja veza L_{max} i L_{ave} .



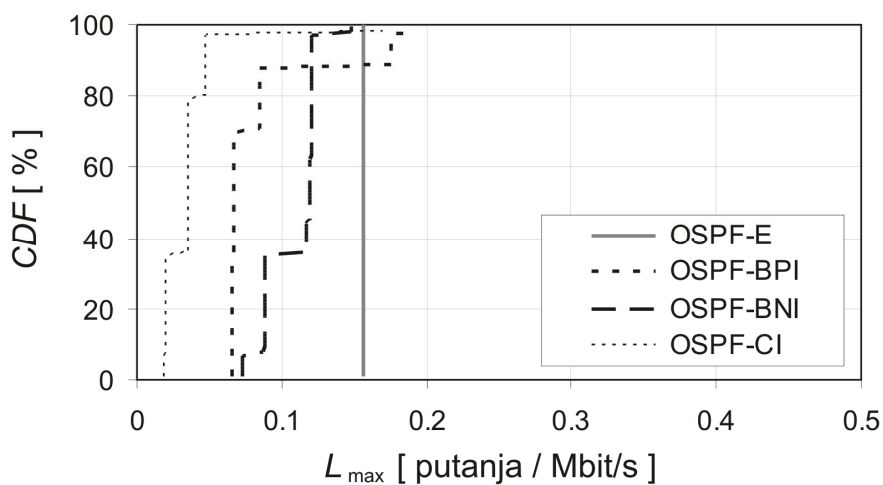
Sl. 5-11. CDF parametra opterećenja mreže L_{max} za slučaj jake kiše
 $R_{max}=40mm/h$, $\rho=2.5km$



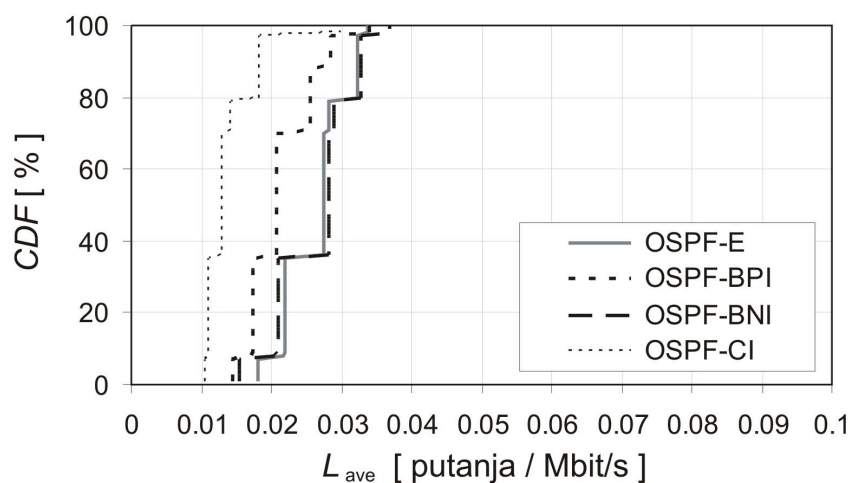
Sl. 5-12. CDF parametra opterećenja mreže L_{ave} za slučaj jake kiše
 $R_{max}=40\text{mm/h}$, $\rho=2.5\text{km}$

Statistička analiza performansi mreže u prisustvu kritične kišne ćelije parametara $R_{max} = R_{max}^{CRC}=40\text{mm/h}$ i $\rho=\rho^{CRC}=2.5\text{km}$, pokazuju da OSPF-CI uvek ima najbolje rezultate, a OSPF-E u najvećem broju slučajeva najlošije rezultate. Protokoli OSPF-CI, OSPF-BPI i OSPF-BNI, u slučaju ove mreže u potpunosti štite saobraćaj u mreži. Za razliku od njih, u oko 38% slučajeva pozicije kritične kišne ćelije dolazi do prekida glavnih putanja, te protokol OSPF-E ne može da ostvari sve saobraćajne zahteve i opterećenje veza je beskonačno. U oko 80% slučajeva pozicije kritične kišne ćelije ukupne performanse protokola OSPF-BNI i OSPF-BPI biće približno iste, u oko 6% slučajeva protokol OSPF-BPI daje bolje rezultate, a u preostalih 14% slučajeva protokol OSPF-BNI ima bolje rezultate.

U slučaju kiše umerenog intenziteta ($R_{max}=20\text{mm/h}$ i $\rho=2.5\text{km}$), OSPF-CI protokol ima najbolje rezultate a OSPF-E najlošije, što je prikazano na Sl. 5-13., Sl. 5-14. Značajno je da kišna ćelija ovih parametara ne izaziva gubitak saobraćaja već samo redukciju kvaliteta izazvanu smanjenjem kapaciteta pojedinih veza. Međutim, za razliku od kiše velikog intenziteta protokol OSPF-BPI daje приметно bolje rezultate u odnosu na protokol OSPF-BNI. Posebno u pogledu vrednosti parametra srednjeg opterećenja L_{ave} , što je prikazano na Sl. 5-14., ukupne performanse protokola OSPF-BNI su vrlo bliske OSPF-E protokolu.



Sl. 5-13. CDF parametra opterećenja mreže $L_{\max}$ za slučaj umerene kiše
 $R_{\max}=20\text{mm/h}$, $\rho=5\text{km}$



Sl. 5-14. CDF parametra opterećenja mreže L_{ave} za slučaj umerene kiše
 $R_{\max}=20\text{mm/h}$, $\rho=5\text{km}$

U Tab. 3 upoređena su relativna pogoršanja srednjeg opterećenja L_{ave} i maksimalnog opterećenja $L_{\max}$ u odnosu na rezultate u odsustvu kišne ćelije koja se dobijaju u 50% poziciji kišne ćelije.

Tab. 3. Pogoršanje parametara opterećenja veza u odnosu na performanse mreže u odsustvu kišne ćelije u 50% slučajeva slučajnog izbora lokacije kišne ćelije

Kišna ćelija	Način usmeravanja	OSPF-E	OSPF-CI	OSPF-BNI	OSPF-BPI
$R_{\max}=20\text{mm/h}$ $\rho=5\text{km}$	$L_{\max}$	10.0	2.3	7.0	3.7
	L_{ave}	2.9	1.4	2.5	2.0
$R_{\max}=40\text{mm/h}$ $\rho=2.5\text{km}$	$L_{\max}$	99.8	23.4	60.4	70.3
	L_{ave}	25.3	4.8	13.4	15.7

Na osnovu prikazanih rezultata u Tab. 3. može se zaključiti kakav utisak će imati korisnik mreže prilikom pojave kišnog događaja. U slučaju slabijih intenziteta kiše primena protokola OSPF-CI ili OSPF-BPI uzrokuje degradaciju zbog povećanja opterećenja u najgorem slučaju 2.3, odnosno 3.7 puta, a u proseku 1.4 odnosno 2 puta, te većina korisnika neće primetiti značajnu razliku u odnosu na uobičajene pojave povećanog opterećenja u mreži koje nastaju i u odsustvu kišnih događaja. Rezultati L_{ave} za OSPF-E i OSPF-BNI nisu mnogo lošiji, ali za $L_{\max}$ jesu, pa će određen broj korisnika sigurno primetiti lošije performanse u prisustvu kiše.

Sa druge strane u prisustvu izuzetno jake kiše dolazi do značajne degradacije, koja će sigurno biti primećena od strane korisnika. Dobijeni rezultati pokazuju da protokol OSPF-BNI u ovom slučaju ima određenu prednost u odnosu na protokol OSPF-BPI, ali su oba protokola oko tri puta lošija u odnosu na OSPF-CI.

5.3. Performanse mreže prema kriterijumu maksimalnog protoka dodeljenog pojedinačnom zahtevu

Kriterijum maksimalnog protoka dodeljenog pojedinačnom zahtevu definisan je u poglavlju 3.4. Za ocenu performansi koristi se kriterijumska funkcija S_{ave} .

Budući da se deo saobraćajnih zahteva za svaki od algoritama usmeravanja obavlja deljenjem saobraćaja na dva toka preko dve putanje, očekivano je da maksimalni ostvarivi protok za realizaciju jednog saobraćajnog zahteva u odsustvu kišne ćelije prevazilazi vrednost od 1Gbit/s. Posebno u slučaju protokola OSPF-BNI deo zahteva se obavlja preko putanja koje nemaju zajedničkih veza te je za takve zahteve ostvariv praktično dvostruki protok u odnosu na kapacitet jedne veze i iznosi 2Gbit/s. Za posmatranu mrežu, statistike višestrukih putanja date su u Tab. 4.

Tab. 4. Karakteristike mreže u odsustvu kišne ćelije

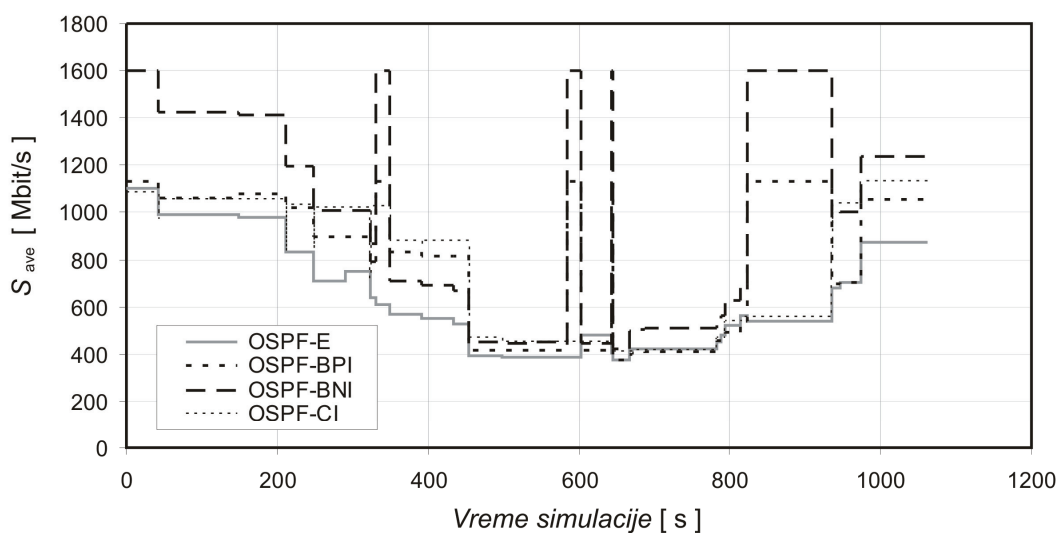
Način usmeravanja	OSPF-E	OSPF-CI	OSPF-BNI	OSPF-BPI
Ukupni procenat višestrukih putanja*	19.6%	19.6%	100%	46.9%
Procenat višestrukih putanja koje sadrže veze različite od veza u glavnim putanjama*	12.1%	12.1%	100%	37.8%
S_{ave} [Mbit/s]	1101	1086	1598	1131

* procenat je računat u odnosu na ukupan broj saobraćajnih zahteva (132 u datoj mreži)

5.3.1. Rezultati dinamičke analize

Na Sl. 5-15. prikazani su rezultati dinamičke analize performansi mreže prema kriterijumu maksimalnog protoka dodeljenog pojedinačnom saobraćajnom zahtevu. Pošto je procenat zahteva za koji postoji rezervna putanja u slučaju protokola OSPF-BNI i OSPF-BPI značajno veći u odnosu na referentne slučajeve OSPF-E i OSPF-CI i postignuti rezultati su приметно bolji u oba slučaja. To je posebno izraženo na početku

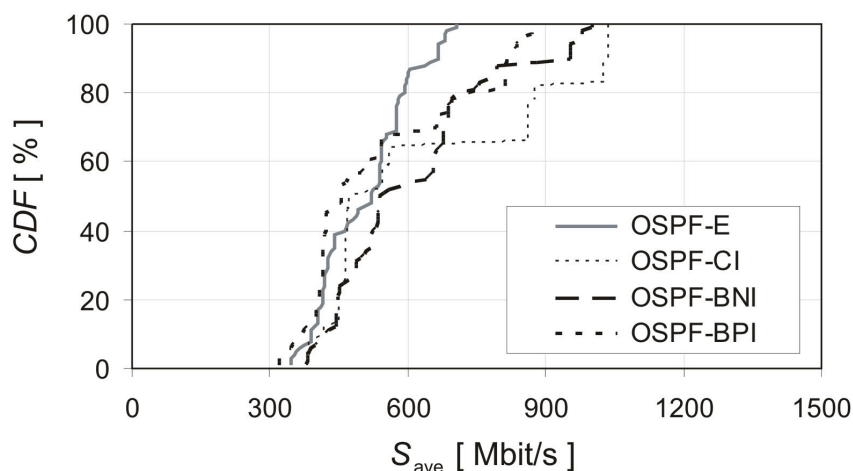
i kraju dinamičke simulacije, kada kišna ćelija zahvata periferiju mreže, te ne dolazi do značajnije redukcije kapaciteta veza ili njihovog prekida.



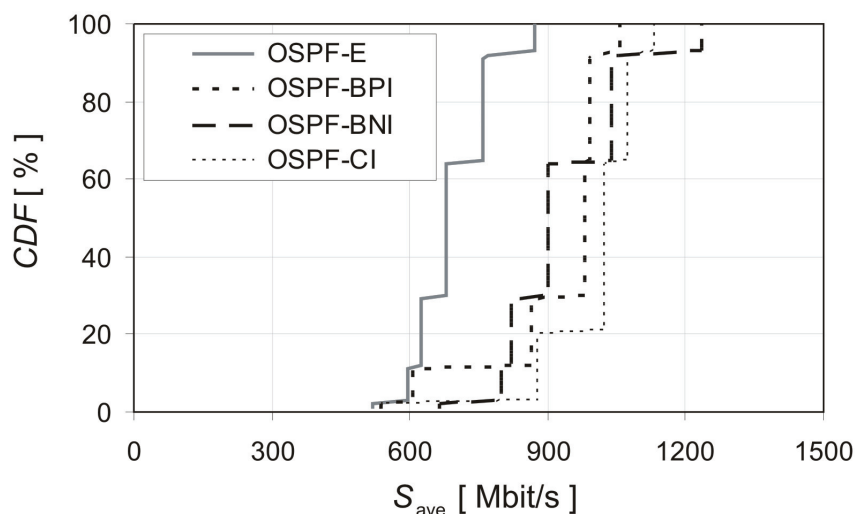
Sl. 5-15. Promena parametra maksimalnog protoka S_{ave} pri kretanju kišne ćelije

5.3.2. Rezultati statističke analize

Na Sl. 5-16 i Sl. 5-17. prikazani su rezultati statističke analize performansi mreže prema kriterijumu maksimalnog protoka dodeljenog pojedinačnom saobraćajnom zahtevu.



Sl. 5-16. CDF parametra maksimalnog protoka S_{ave} za slučaj jake kiše
 $R_{max}=40\text{mm/h}$, $\rho=2.5\text{km}$



Sl. 5-17. CDF parametra maksimalnog protoka S_{ave} za slučaj umerene kiše $R_{max}=20\text{mm/h}$, $\rho=5\text{km}$

Statistička analiza pokazuje da u prisustvu kišne ćelije sa velikim intenzitetom kiše, koja izaziva pad kapaciteta ili prekid većeg broja veza dolazi do značajne degradacije parametra srednjeg opterećenja S_{ave} . U oko 63% slučajeva postoje razlike između protokola usmeravanja, ali one nisu mnogo značajne. Kao što je očekivano, najbolje performanse dobijaju se u slučaju protokola OSPF-BNI. U oko 37% slučajeva protokol OSPF-CI daje najbolje rezultate, što je uzrokovano činjenicom da je veći broj veza sa značajnom redukcijom kapaciteta, ili je u prekidu, te za značajan broj saobraćajnih zahteva nije ostvarivo deljenje saobraćaja na glavnu i rezervnu putanju.

Kao što je očekivano, u prisustvu kišne ćelije umerenog intenziteta kiše, maksimalne vrednosti protoka se mogu ostvariti primenom protokola OSPF-BNI. Razlog za to je što se saobraćaj obavlja po putanjama koje ne sadrže iste veze te je ukupan kapacitet jednak zbiru kapaciteta svake od njih. Ovaj slučaj se pojavljuje samo za 7% lokacija kišnih ćelija. U 93% slučajeva najbolji rezultati dobijaju se za referentni protokol OSPF-CI, dok protokol OSPF-BPI u većem procentu slučajeva u odnosu na protokol OSPF-BNI omogućava ostvarenje većih protoka. Performanse OSPF-E algoritma su značajno lošije od ostala tri.

U Tab. 5. prikazano je poređenje performansi algoritama raspodele saobraćaja pri dejstvu kišne ćelije u odnosu na slučaj bez dejstva kišne ćelije.

Tab. 5. S_{ave} [Mbit/s] ostvaren na 50% lokacija kišne ćelije

Način usmeravanja	OSPF-E	OSPF-CI	OSPF-BNI	OSPF-BPI
<i>Bez kiše</i>	1101	1086	1598	1131
$R_{\text{max}} = 20\text{mm/h}$ $\rho = 5\text{km}$	678	1025	901	981
$R_{\text{max}} = 40\text{mm/h}$ $\rho = 2.5\text{km}$	537	472	538	455

Pokazano je da u prisustvu kiše umerenog intenziteta performanse protokola OSPF-CI i OSPF-BPI malo degradiraju, dok je degradacija performansi za protokole OSPF-BNI i OSPF-E značajna. Pri velikim intenzitetima kišne ćelije i performanse protokola OSPF-CI i OSPF-BPI značajno degradiraju, pa protokol OSPF-BNI pokazuje najbolje performanse. Iako je razlika u performansama pri dejstvu jake kiše između protokola OSPF-BNI i OSPF-E algoritama prema podacima u Tab. 5. neznatna, uvidom u rezultate kompletnog CDF-a na Sl. 5-16. pokazuje se da protokol OSPF-BNI ima značajnu prednost.

6. DISKUSIJA

U ovom poglavlju data je rekapitulacija rezultata analize performansi i razmatrane su mogućnosti praktične realizacije. Naznačeni su pravci daljih istraživanja.

6.1. Rekapitulacija performansi mreže

Algortimi za izračunavanje rezervne putanje NOPHY i PHY, poboljšavaju performanse mreže kada je intenzitet kiše takav da ne dolazi do prekidanja povezanosti grafa mreže, odnosno kada je maksimalni intenzitet kiše u centru kišne ćelije $R_{\max}$ manji od kritične vrednosti $R_{\max}^{\text{CRC}}$. Zbog toga je od interesa analiza performansi mreže u slučajevima dok je $R_{\max} \leq R_{\max}^{\text{CRC}}$.

Rezultati dobijeni dinamičkom analizom uticaja pomerajuće kišne ćelije su na primeru prvog referentnog slučaja OSPF, ukazali na slabosti koncepcije kod koje se preusmeravanje paketa obavlja samo posle promene stanja veze. U ovom slučaju dolazi do velikog gubitka saobraćaja, što je vrlo izraženo za kriterijum maksimizacije proporcionalno fer raspodeljenog kapaciteta veza i za kriterijume opterećenja mreže. Kao što je očekivano, preusmeravanje paketa posle svake promene stanja i kapaciteta u mreži, simulirano "idealnim" protokolom usmeravanja OSPF-C prema kriterijumu proporcionalno fer raspodele kapaciteta pokazuje najbolje rezultate. Takođe i prema kriterijumu opterećenja veza ovaj kriterijum daje najbolje rezultate u najvećem procentu vremena dinamičke analize.

Rezultati dinamičke analize pokazuju da prema kriterijumu maksimizacije proporcionalno fer raspodeljenog kapaciteta, protokoli OSPF-BPF i OSPF-BNF

sprečavaju gubitak saobraćaja koji se pojavljuje u slučaju referentnog protokola OSPF-F. Takođe, performanse protokola OSPF-BPF su vrlo bliske performansama drugog referentnog protokola OSPF-CF. Prema kriterijumima opterećenja veza: L_{ave} i L_{max} , u najvećem delu toka simulacije performanse protokola OSPF-BPI i OSPF-BNI su između referentnih protokola OSPF-E i OSPF-CI. Prema kriterijumu maksimalnog protoka dodeljenog pojedinačnom saobraćajnom zahtevu S_{ave} postojanje više putanja značajno poboljšava performanse, te je protokol OSPF-BNI, kod koga glavna i zaštitna putanja ne sadrže zajedničke veze pokazuje najbolje rezultate.

Rezultati statističke analize se mogu podeliti u dve grupe. Jednu predstavljaju rezultati za kišu umerenog intenziteta, a drugu rezultati za kišu velikog intenziteta. Pod dejstvom kiše umerenog intenziteta dominantna je pojava redukcije kapaciteta veze. U tim uslovima, prema kriterijumu maksimizacije proporcionalno fer raspodeljenog kapaciteta veza u mreži OSPF-CF, OSPF-BNF i OSPF-BPF su približno jednaki i primetno bolji od OSPF-F. Prema kriterijumu parametara opterećenja veza L_{ave} i L_{max} , značajnu prednost ima OSPF-CI, a sledi ga protokol OSPF-BPI koji prema ovom kriterijumu pokazuje nešto bolje rezultate od protokola OSPF-BNI. Prema kriterijumu maksimalnog protoka dodeljenog pojedinačnom zahtevu S_{ave} , protokoli OSPF-CI i OSPF-BPI imaju nešto lošije performanse u odnosu na performanse mreže u odsustvu kiše, dok su za protokole OSPF-BNI i OSPF-E performanse značajno lošije. Međutim, za određeni procenat lokacija, protokol OSPF-BNI uspeva da ostvari najveće protoke u odnosu na ostala tri algoritma.

Pod dejstvom kiše velikog intenziteta pored redukcije kapaciteta, dolazi i do prekida veza. To za posledicu ima da referentni protokol OSPF ne može da opsluži određeni procenat saobraćajnih zahteva. Prema kriterijumu maksimizacije proporcionalno fer raspodeljenog kapaciteta veza, OSPF-CF ima najbolje performanse, zatim slede OSPF-BPF i OSPF-BNF, dok OSPF-F ima najlošije performanse. Prema kriterijumu opterećenja veza i protokoli OSPF-BPI i OSPF-BNI za većinu lokacija daju slične rezultate, dok na određenom manjem procentu lokacija protokol OSPF-BNI ima značajniju prednost. Prema kriterijumu maksimalnog protoka dodeljenog pojedinačnom saobraćajnom zahtevu degradacija i za protokol OSPF-CI i OSPF-BPI postaje značajna,

tako da ukupno posmatrano za jake kišne ćelije protokol OSPF-BNI daje najbolje rezultate.

6.2. Mogućnosti praktične realizacije

Analiza kriterijuma opterećenja veza i maksimizacije protoka dodeljenog pojedinačnom saobraćajnom zahtevu ukazale su na značaj izbora algoritma raspoređivanja saobraćaja između glavne i rezervne putanje. Predloženi iterativni postupak raspoređivanja saobraćaja podrazumeva da je svakom usmerivaču iz koga počinje opsluživanje saobraćajnog zahteva prisutan blok za deljenje saobraćaja između glavne i rezervne putanje. U matematičkom modelu je pretpostavljeno da je poznata informacija o trenutnom kapacitetu veze i broju saobraćajnih zahteva koje data veza opslužuje. Informacija o broju saobraćajnih zahteva koji opslužuje data veza je uvek dostupna usmerivačima jer je na osnovu nje formirana osnovna tabela preusmeravanja. Sa druge strane, informacija o trenutnom kapacitetu veza se može dobiti od transportnog sistema koji realizuje datu vezu preko posebnog podsistema koji može biti realizovan na primer preko SNMP protokola [RFC 3411].

Iako ova vrsta komunikacije spada u komunikaciju između slojeva OSI modela, koja je konceptom zaštitnih putanja trebala da bude izbegnuta, ona je značajno manja i manje osetljiva na kašnjenje i oštećenje informacija nego što je to u slučaju dostavljanja podataka o trenutnom kapacitetu, koja je neophodna za rad protokola OSPF-C. Praktično za rad protokola OSPF-C pored uspešnog dostavljanja informacije o kapacitetu veza, neophodno je da svi usmerivači sinhrono započnu postupak preračunavanja putanja. Kod promene koeficijenata raspoređivanja saobraćaja ova informacija nije kritična i nagle promene se mogu jednostavno sprečiti filtriranjem koeficijenata raspoređivanja saobraćaja u vremenu, na primer jednostavnim algoritmom pokretnog usrednjavanja (engl. *moving average*) ili filtrom konačnog impulnog odziva [Proakis 07].

Ipak, dato usložnjavanje se može izbeći jer je trenutno opterećenje veza proporcionalno broju paketa u odlaznom i dolaznom redu čekanja [Retana 99], što sami usmerivači mogu jednostavno meriti i preračunavati. Performanse takvog sistema su predmet daljeg istraživanja.

Napomenimo da se zbog problema varijacije kašnjenja paketa ne očekuje da se raspoređivanje vrši na nivou svakog paketa, već na nivou jednog servisa ili grupe servisa, kao što je to, na primer, slučaj u implementaciji MPLS prenosnih sistema [Perros 05] .

6.3. Procenti vremena u kome se mogu očekivati date performanse mreže

Kao što je napomenuto u uvodnom poglavlju u ovoj disertaciji je usvojen pristup da se posmatra pojava kiše na osnovu fizičkog modela njene dvodimenzionalne raspodele kao kišna ćelija koja se kreće nošena vetrom. Iako je u citiranoj literaturi, koja se prvenstveno bavi kišom kao meteorološkom pojavom usvojen ovakav model, za projektovanje telekomunikacionih mreža neophodno je poznavanje procenta vremena u kome će mreža imati date performanse. Model opisan u [ITU-R Rec.P.530-13] bazira na gruboj aproksimaciji kumulativne raspodele intenziteta kiše $R(t)$ u jednoj tački prostora, opisane jednom jedinom vrednošću: intenzitetom kiše prevaziđenom u 0.01% vremena $R_{0.01\%}$. Dvodimenzionalna struktura kiše se simulira skraćivanjem dužine trase koje je opisano efektivnom dužinom trase. Čak i ovako grub model vrlo često nije moguće primeniti jer je parametar $R_{0.01\%}$, izrazito lokalnog karaktera, i važi za uže geografsko područje. Dodatni problem se javlja u činjenici da je za telekomunikacione probleme značajno poznavanje $R(t)$ dobijene merenjem intenziteta kiše u vremenima integracije ispod deset sekundi ili čak jednog sekunda [ITU-T G.826], što je ekvivalent brojanja kišnih kapi. Merenje klasičnim kišnim sondama daje podatke za nekoliko časova, koje se aproksimativnim metodama svode na kraća vremena integracije. Imajući u vidu da statistike kiše treba pratiti minimalno deset godina, praktično primenljivi precizni rezultati su raspoloživi samo za mala geografska područja kao što je na primer prikazano u [Cheffena 09]. Iako nedovoljni za precizniji proračun, ovi modeli ipak daju

indikaciju o verovatnoći pojave kišne ćelije određenog intenziteta, posebno u sprezi sa preciznijim modelima kumulativne raspodele intenziteta kiše [Emiliani 09]. U budućim istraživanjima planira se izrada preciznijeg modela za proračun kvaliteta i neraspoloživosti veze bazirane na složenijim metereološkim modelima, sa posebnim akcentom na skaliranje rezultata merenja na drugim frekvencijskim opsezima.

7. ZAKLJUČAK

U radu su analizirane metode zaštite saobraćaja u IP mrežama realizovane radio-relejnim vezama iznad 70GHz. U ovim frekvencijskim opsezima slabljenje usled kiše predstavlja dominantni propagacijski efekat koji uzrokuje promenu kapaciteta i stanja veza, što za posledicu ima degradaciju performansi mreže. Predložena su dva algoritma za izračunavanje rezervnih putanja NOPHY i PHY, koji se koriste u metodi zaštite saobraćaja u mreži realizovane radio-relejnim vezama iznad 70GHz. Oba algoritma baziraju se na unapred izračunatim zaštitnim putanjama. Na osnovu ovih algoritama definisani su modifikovani OSPF protokoli sa rezervnim putanjama OSPF-BP i OPSF-BN. Usmerivači na kojima su implementirani ovi protokoli raspoređuju saobraćaj između glavnih i zaštitnih putanja. Analizirani su različiti načini raspoređivanja saobraćaja, a definisan je i nov iterativni način raspoređivanja kojim se postiže ravnomernije opterećenje glavne i rezervne putanje, kao i zaštita u slučaju prekida jedne od njih.

Definisani su i referentni slučajevi za poređenje performansi novih protokola: standardni OSPF protokol i "idealni" OSPF-C kod koga se nove putanje preračunavaju trenutno, posle svake promene stanja ili kapaciteta veza u mreži.

U cilju ocene kvaliteta zaštite saobraćaja koji pružaju dati algoritmi u radu su predložena tri kriterijuma za ocenu performansi IP radio mreža realizovanih iznad 70GHz. To su: maksimizacija proporcionalno fer raspodeljenog kapaciteta veza u mreži, opterećenje veze i maksimalni protok dodeljen pojedinačnom saobraćajnom zahtevu. U prvom slučaju, saobraćaj se raspoređuje prema fer raspoređivanju koje je rezultat maksimizacije kriterijumske funkcije, odgovarajući protokoli su OSPF-BPF, OSPF-BNF, i referentni protokoli OSPF-F i OSPF-CF. U druga dva slučaja, razmatrana su dva

načina raspoređivanja saobraćaja: ravnomerno raspoređivanje koje je jednostavno za implementaciju i raspoređivanje sa koeficijentima koji se određuju predloženim iterativnim algoritmom kojim se postiže ravnomernije opterećenje glavne i rezervne putanje. Analize su izvršene za ravnomerno raspoređivanje u slučaju referentnog protokola OSPF-E i za iterativno raspoređivanje saobraćaja u slučaju referentnog protokola OSPF-CI i novih protokola sa rezervnim putanjama OSPF-BPI, OSPF-BNI.

Ocena performansi izvršena je na test mreži sa usvojenim modelom pomerajuće kišne ćelije koji utiče na performanse tako što izaziva promene stanja i kapaciteta veza u vremenu. Izvršene su dve analize: dinamička analiza i statistička analiza. U dinamičkoj analizi se prati promena kriterijumske funkcije za ocenu performansi u vremenu kada se pomerajuća kišna ćelija kreće usvojenom putanjom preko grafa mreže. Statistička analiza u kojoj se ispituje uticaj svih mogućih položaja pomerajuće kišne ćelije na kriterijumsku funkciju za ocenu performansi mreže.

Rezultati dinamičke i statističke analize potvrdili su slabosti klasičnog algoritma usmeravanja OSPF, te je neophodno primeniti metode zaštite saobraćaja. Od metoda zaštite najbolje performanse ima protokol OSPF-C kod koga se preusmeravanje vrši nakon svake promene kapaciteta i stanja veze. Međutim, imajući u vidu konačnu brzinu konvergencije algoritma preusmeravanja i česte promene kapaciteta i stanja veza u mreži usled uticaja kišne ćelije koje iniciraju nove zahteve za preusmeravanjem, ovo rešenje nije uvek najbolje u praksi. Rezultati statističke analize pokazuju da primena protokola OSPF-BP daje neznatno lošije rezultate u odnosu na OSPF-C za umerenu kišu. Pri jakoj kiši, rezultati statističke analize za protokol OSPF-BN su bolji i više se približavaju drugom referentnom protokolu OSPF-C.

Pokazan je značaj načina raspoređivanja saobraćaja između glavne i rezervne putanje. Predloženi iterativni postupak raspoređivanja je relativno jednostavan za implementaciju. U daljem istraživanju bilo bi potrebno izvršiti optimizaciju algoritma raspoređivanja saobraćaja za IP mreže iznad 70GHz sa ciljem da ovaj algoritam ne bude zavisn od karakteristika saobraćaja koji se prenosi.

Drugi pravac istraživanja je obezbeđivanje složenijih modela dvodimenzionalne raspodele kiše za ocenu performansi mreže, da bi se preciznije određivali procenti vremena u kojima su ostvarive date performanse mreže. Za ovu analizu su neophodna opširnija metereološka istraživanja.

8. LITERATURA

- [Abdou 03] Abdou A., Lebel T., Amani A., "Invariance in the Spatial Structure of Sahelian Rain Fields at Climatological Scales", Journal of Hydrometeorology Vol.4, December 2003, American Meteorological Society
- [Albrightson 94] Albrightson B., Garcia-Lunes-Aceves J.J., Boyle J., "EIGRP - A Fast Routing Protocol Based on Distance Vectors", ' *Proc. Networld/Interop 94*, Las Vegas, Nevada, May 1994
- [Bahder 95] Bahder T.B. *Mathematica* for Scientists and Engineers, Addison-Wesley, 1995
- [Bonati 99] Bonati A. P., "Essential Knowledge of Rain Structure For Radio Application Based on Available Data and Models", Radio Africa 99, October 1999
- [Champion 08] Champion B., Strzebonski A., *Constrained Optimization*, Wolfram *Mathematica*-Tutorial Collection, Wolfram Research, Inc., 2008
- [Cheffena 09] Cheffena M., Braten L.E., Ekman T., "On the Space-Time Variations of Rain Attenuation", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 57, No. 6, June 2009
- [Cioni 03] Cioni, S., De Gaudenzi, R., Rinaldo, R., Adaptive coding and modulation for the forward link of broadband satellite networks, GLOBECOM'03 proceedings p. 3311 - 3315 vol.6, San Francisco, 2003
- [Crane 80] Crane R.K., "Prediction of Attenuation by Rain", IEEE Transactions on Communications, vol. COM-28, No. 9, September 1980
- [Dijkstra 59] Dijkstra, E.W. "A Note on Two Problems in Connexion with Graphs", *Numerische Mathematik* 1, 269–271., 1959

- [DVB-S] ETSI EN 300 421, "Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services V1.1.2 (1997-08)", European Telecommunications Standards Insitutute, 1997
- [ECC Rec. (05)07] ECC Rec. (05)07 Radio Frequency Channel Arrangements for Fixed Service Systems Operating in the Bands 71-76 GHz and 81-86 GHz, Edition February 2009
- [Emiliani 09] Emiliani L.D., Luini L., Capsoni C., "Analysis and Parameterization of Methodologies for the Conversion of Rain-Rate Cumulative Distributions from Various Integration Times to One Minute", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 51, No.3, June 2009
- [EN 302 217] ETSI EN 302 217-4-2 V1.3.1 (2007-10) Fixed Radio Systems; Characteristics and requiremets for point-to-point equipment and antennas; Part 4-2: Harmonized EN covering essential requirements of Article 3.2. of R&TTE Directive for antennas
- [Enjamio 03] Enjamio C., Vilar E., Fontan F. P., Redano A., Ndzi D. , "Dimensions and Dynamic Evolution of Microscale Rain Cells", 2nd International Workshop ES TEL, Noordwijk, The Netherlands, May 26-28 2003
- [Farin 08] Farin G., Hansford D., *Mathematical Principles for Scientific Computing and Visualization*, A K Peters, 2008
- [FCC-05-45] FCC 05-45: Allocations and Service Rules for the 71-76 GHz, 81-86 GHz, and 92-95 GHz Bands, WT Docket No. 02-146, MEMORANDUM OPINION AND ORDER, Federal Communications Commission, March 3, 2005
- [Feldhake 02] Feldhake G.S. , Sengers A., "Comparison of Multiple Rain Attenuation Models with Three Years of Ka Band Propagation Data Concurrently Taken at Eight Different Locations", www.spacejournal.org, Issue no.2 Fall 2002
- [Feral 03] Feral L, Lemorton J, Laurent C, Sauvageot H, "Hycell: A New Model of Rain Fields and Rain Cells Structure, RADIO SCIENCE, VOL. 38, 1056, 20 PP., 2003

- [Forero 08] Forero C. A. V., Seed A., Sempere-Torres D. Pegram G., "Optimal Estimation Of Rainfall Fields Merging Radar And Rain Gauges Data In An Operational Context", ERAD 2008, The Fifth European Conference On Radar In Meteorology And Hydrology, Helsinki, 2008
- [Garcia 93] Garcia-Lunes-Aceves J.J, "Loop-Free Routing Using Diffusing Computations", IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 1., No. 1., February 1993.
- [Goldsmith 05] Goldsmith A. Wireless Communications, Cambridge University Press, 2005.
- [Hirata 09] Hirata A., Takahashi H., Kosugi T., Murata K., Naoya K., Kado Y., "Rain Attenuation Statistics for a 120-GHz-Band Wireless Link", *International Microwave Symposium Digest*, Boston, June 2009, pp. 933-936
- [ITU-R PN.837-1] Rec. ITU-R P.837-1, "Characteristics Of Precipitation For Propagation Modelling (Question Itu-R 201/3)", 1994.
- [ITU-R Rec. F.1704] ITU R Rec. F.1704, "Characteristics of multipoint-to-multipoint fixed wireless systems with mesh network topology operating in frequency bands above about 17 GHz", 2005.
- [ITU-R Rec. P.676] Rec. ITU-R P.676-5, "Attenuation by Atmospheric Gases", 1990-2001
- [ITU-R Rec. P.838-3] ITU-R rec. P.838-3, "Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods", 2005.
- [ITU-R Rec.P.530-13] ITU-R Rec. P.530-13, "Propagation Data and Prediction Methods Required for Design of Terrestrial Line of Sight Systems", 10/2009
- [ITU-T G.826] ITU-T Rec. G.826, "Error performance parameters and objectives for international, constant bit rate digital paths at or above the primary rate", 1999.
- [ITU-T X.210] ITU-T Rec. 210, "Information Technology - Open Systems Interconnection - Basic Reference Model: Conventions for the Definition of OSI Services", 1994.

- [ITU-T Y.1001] ITU-T Rec. Y.1001, IP framework, A Framework For Convergence Of Telecommunications Network And IP Network Technologies, 2000.
- [ITU-T Y.1541] ITU-T Rec. Y.1541 Network performance objectives for IP-based services, 2006.
- [Ivanek 89] Ivanek F., editor, *Terrestrial Microwave Communications*, Artech House, 1989.
- [Jabbar 08] Jabbar A., Raman B., Frost B., Sterbenz J., "Weather Disruption-Tolerant Self-Optimizing Millimeter Mesh Networks", *Third International IFIP/IEEE Workshop on Self-Organizing Systems (IWSOS 2008)*, Vienna, December 2008
- [Lin 83] Lin S., Costello D. *Error Control Coding*, Prentice Hall 1983.
- [Liu 07] Liu C., Shu Y., Zhang L., Maode M., "Backup Routing for Multimedia Transmissions over Mesh Networks", *Communications, 2007. ICC '07. IEEE International Conference on*, 3829 - 3834, Glasgow, 2007
- [Matricciani 00] Matricciani E., Pawlina A., "Statistical characterization of rainfall structure and occurrence for convective and stratiform rain inferred from long term point rain rate data", *AP 2000 Millennium Conference on Antennas & Propagation*, Davos, Switzerland, 9-14 April 2000
- [Mayer 99] Mayer W., "Comparison of Fade Models for LMDS", *IEEE 802.16cc-99*
- [Maeder 97] Maeder R. E., *Programming in Mathematica*, third edition, Addison-Wesley, 1997.
- [Mérindol 10] Mérindol P., François P., Bonaventure O., Cateloin S., Pansiot J.J., "An efficient algorithm to enable path diversity in link state routing networks", *Computer Networks*, Elsevier B.V., November 2010.
- [Newman 04] Newman P. "In Search of the All-IP Mobile Network", *IEEE Radio Communications*, p. s3-s8, December 2004.
- [Ns2] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [OfW 369] OfW 369: "Guidance Notes for Self Co-ordinated Licence and Interim Link Registration Process in the 71.125-75.875 GHz and 81.125-

85.875GHz bands (March 2007)", OFCOM Independent regulator and competition authority for the UK communications industries, 2007.

[Opnet] www.opnet.com

[Pemmaraju 03] Pemmaraju S., Skiena S., *Computational discrete mathematics: combinatorics and graph theory with Mathematica*, Cambridge University Press, 2003

[Pepelnjak 99] Pepelnjak I., "EIGRP network design solution", CISCO Press, 1999.

[Peric IEEE CL 10] Perić D., Perić M., Todorović B., "Traffic Protection Method in IP Radio Networks above 70 GHz", IEEE Communications Letters, Vol. 14, No. 10, pp. 981-983, October 2010

[Peric ETRAN 05] Perić D., Perić M., "MMW MESH- Software for Analysis of Bound Behaviour of LAN Interconnected by Millimeter Wave Radio Links", *Zbornik radova 49. Konferencije ETRAN*, Vol. 2., str.122-125, Budva, 2005

[Peric ETRAN 07] Perić D., Perić M., "Simulator rutin protokola u okruženju Wolfram Research Mathematica", *Zbornik radova 51. Konferencije ETRAN*, str. TE 4.4.1-4.4.4, Herceg Novi, 2007

[Perić ETRAN 08] Perić M., Perić D., Obradović D., Orlić V., "Realizacija obrade signala na međufrekvenciji i osnovnom opsegu u radio-relejn timerajima IMTEL-Komunikacije serije B", *Zbornik radova 52. Konferencije ETRAN*, str. TE 4.5.1-4.5.4, Palić, 2008

[Peric ETRAN 10] Perić D., Perić M., "Analiza dinamičkih performansi mreže realizovane na milimetarskom opsegu", *Zbornik radova 54. Konferencije ETRAN*, str. MT 3.6.1-3.6.4, Donji Milanovac, 2010

[Peric IST 05] Perić D., Perić M., Petrović G., "Redundant Topology in Computer Network Realized with Millimeter Wave Radio Links", *14th IST Mobile and Wireless Summit*, Dresden, June 2005

[Peric SPECTS 07] Perić D., Perić M., Petrović G., "Performance of Different Methods of Protection in 60 GHz Radio Networks with IP Traffic", International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems SPECTS 2007, San Diego, CA, USA, July 16-18

- [Peric TELSIKS 05] Perić D., Perić M., "Critical Rain Intensity for Millimeter Wave Radio Link IP Network with Partial Mesh Topology", *Proceedings of 7th Conference TELSIKS*, Vol.2, pp. 460-463, Niš, Septembar 2005.
- [Perros 05] Perros H. G., *Connection-oriented Networks SONET/SDH, ATM, MPLS and OPTICAL NETWORKS*, John Wiley & Sons, 2005
- [Pioro 04] Pioro M., Medhi D., *Routing, Flow, Capacity Design in Communication and Computer Networks*, Morgan Kaufmann, 2004
- [Proakis 07] Proakis J. G., Manolakis D., *Digital Signal Processing - Principles, Algorithms and Applications*, Pearson, 2007
- [Rappaport 02] Rappaport T., Annamalai A., Buehrer R.M., Tranter W.H. "Wireless Communications: Past Events and a Future Perspective", *IEEE Communications Magazine*, 50th Anniversary Commemorative Issue, p148.-161., May 2002
- [Retana 99] Retana A., Slice D., White R., *Advanced IP network design (CCIE) professional development*, CISCO Press, 1999
- [RFC 791] RFC 791 Internet Protocol (IP)
- [RFC 1058] RFC 1058 Routing Information Protocol (RIP)
- [RFC 1122] RFC 1122, Requirements for Internet Hosts - Communication Layers, October 1989.
- [RFC 2328] RFC 2328 Open Shortest Path First (OSPF) routing protocol
- [RFC 3411] RFC 3411 An Architecture for Describing Simple Network Management Protocol (SNMP) Management Frameworks
- [RFC 5286] RFC 5286 Basic Specification for IP Fast Reroute: Loop-Free Alternates, Network Working Group, September 2008
- [Sahasrabuddhe 02] Sahasrabuddhe R. L., Ramamurthy S., Mukherjee B., "Fault Management in IP-Over-WDM Networks: WDM Protection Versus IP", *IEEE Journal On Selected Areas In Communications*, Vol. 20, No. 1, January 2002
- [Sinka 02] Sinka C, Lakatos B, Bito J, "The Effects of Moving Rain Cell over LMDS Systems", *COST A280, 1st International Workshop*, July 2002

- [TS 102 524] ETSI TS 102 524 V1.1.1 (2006-07), Radio Equipment and Antennas for Use in Point-to-Point Millimeter Wave Applications in Fixed Services Frequency Bands 71 GHz to 76 GHz and 81 GHz to 86 GHz, 2007
- [Tsong-Ho 92] Tsong-Ho W., "A Class of Self-Healing Ring Architectures for SONET Network Applications", IEEE Transactions on communications, Vol. 40, No. 11, November 1992
- [Wang 08] Wang F., Gao L., "A Backup Route Aware Routing Protocol - Fast Recovery from Transient Routing Failures", INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE, p. 2333 - 2341, Phoenix Az., 2008
- [Wells 06] Wells J., "Multigigabit Wireless Technology at 70 GHz, 80 GHz and 90 GHz", *RF Design*, May 2006, pp.50-58
- [Wolfram 03] Wolfram S., *The Mathematica Book*, 5th ed., Wolfram Media, 2003
- [Xiong 00] Xiong F. *Digital Modulation Techniques*, Artech House, 2000