



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Mr Miroslav Perić

**Metod za analizu performansi računarske mreže sa
usmerivačima povezanim radio-relejnim vezama na
frekvencijama iznad 70GHz**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2013.



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 :	Докторска дисертација
Аутор, АУ :	Мр Мирослав Перић, дипл. инж.
Ментор, МН :	Проф. др Мирослав Поповић
Наслов рада, НР :	Метод за анализу перформанси рачунарске мреже са усмеривачима повезаним радио-релејним везама на фреквенцијама изнад 70GHz
Језик публикације, ЈП :	српски / латиница
Језик извода, ЈИ :	српски
Земља публиковања, ЗП :	Република Србија
Уже географско подручје, УГП :	Војводина
Година, ГО :	2013.
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)	7 поглавља / 126 страна / 114 цитата / 8 табела / 36 слика
Научна област, НО :	Електротехника и рачунарство
Научна дисциплина, НД :	Рачунарске комуникације
Предметна одредница / Кључне речи, ПО :	радио-релејне везе изнад 70 GHz, рачунарске мреже, кључни индикатори перформанси, расподела интензитета кише
УДК	
Чува се, ЧУ :	Библиотека Факултета техничких наука, Нови Сад
Важна напомена, ВН :	
Извод, ИЗ :	Ова докторска дисертација се бави истраживањем у перформанси рачунарских мрежа у којима су усмеривачи повезани радио-релејним везама изнад 70GHz. На овим фреквенцијама је доминантан утицај на простирање радио-таласа има слабљење услед кише. Предложен је нови метод анализе перформанси на бази кључних индикатора перформанси којима се симулирају различите врсте сервиса и понашања корисника у мрежи. У циљу одређивања кумулативне функције расподеле на годишњем нивоу нових кључних индикатора перформанси развијен је нови модел дводимензионалне расподеле интензитета кише, који за уже географско подручје на коме је инсталирана мрежа репродукује статистичке параметре кише.
Датум прихватања теме, ДП :	24.05.2012.
Датум одбране, ДО :	___.__.2013.
Чланови комисије, КО :	Председник: Др Мирослав Дукић, ред. проф.
	Члан: Др Милан Шуњеварић, в.н.с. и ред. проф.
	Члан: Др Никола Теслић, ред. проф.
	Члан, коментор: Др Бранислав Тодоровић, в.н.с. и ред. проф.
	Члан, ментор: Др Мирослав Поповић, ред. 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 dissertation			
Author, AU :	Miroslav Peric, MSc			
Mentor, MN :	Miroslav Popovic, PhD			
Title, TI :	Method for performance analysys of computer network with routers connected by radio-relay links at frequencies above 70GHz			
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 :	2013			
Publisher, PB :	Author's reprint			
Publication place, PP :	Novi Sad, Dositeja Obradovica sq. 6			
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	7 chapters / 126 pages / 114 references / 8 tables / 36 pictures			
Scientific field, SF :	Electrical Engineering			
Scientific discipline, SD :	Computer Engineering, Computer Communications			
Subject / Key words, S/KW :	radio links above 70 GHz, computer networks, key performanse indicators, distribution of rain intensity			
UC				
Holding data, HD :	The Library of Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia			
Note, N :				
Abstract, AB :	The PhD thesis deals with research of computer network performance in which routers are connected by digital radio relay links at frequencies above 70GHz. In this frequency band rain attenuation has predominant influence on radio-wave propagation. New method based on network key performanse indicators that simulates different services and user behaviour is proposed. For estimation of annual cumulative distribution of new key performance indicators a new method for two dimensional rain intensity distribution is developed. The method simulates annual rain statistics at short range georaphical area where the network is installed,			
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	24.05.2012.			
Defended on, DE :	___.__.2013.			
Defended Board, DB :	President:	Dr Miroslav Dukić, full prof.		
	Member:	Dr Milan Šunjevarić, s.r.f. and full prof.		
	Member:	Dr Nikola Teslić, full prof.	Menthor's sign	
	Member, co-mentor:	Dr Branislav Todorović, s.r.f. and full prof.		
	Member, mentor:	Dr Miroslav Popović, full prof.		

SADRŽAJ

SADRŽAJ	2
SPISAK TABELA	5
SPISAK SLIKA	6
LISTA SKRAĆENICA	8
LISTA PROMENLJIVIH	11
REZIME	16
1. UVOD	20
1.1. Identifikacija problema i predlog rešavanja	24
1.2. Doprinis disertacije.....	24
1.3. Struktura disertacije.....	25
2. PREGLED LITERATURE	28
2.1. Mreže sa paketskom komutacijom	28
2.2. Zahtevane performanse računarskih mreža	32
2.3. Specifičnosti radio-relejnih veza iznad 70GHz	36
2.3.1. Analiza performansi jedne radio relejne veze RR70GHz	36
2.3.2. Analiza diverzitija putanja u MRR70GHz.....	41

2.4.	Dvodimenzionalna raspodela intenziteta kiše	43
2.4.1.	Merenje intenziteta kiše	43
2.4.2.	Određivanje dvodimenzionalne raspodele intenziteta kiše	44
2.4.3.	Identifikacija i modelovanje kišne ćelije	47
2.4.4.	Metode sinteze kišnih događaja	53
2.4.5.	Modelovanje dinamike kišnih događaja	55
3.	OPIS PREDLOŽENOG METODA ZA ANALIZU PERFORMANSI RR70GHZ I MRR70GHZ NA BAZI KPI	58
3.1.	Analiza performansi na nivou jedne RR70GHz	58
3.2.	Generalizacija analize performansi na nivo mreže MRR70GHz	61
3.2.1.	Matematički model mreže	63
3.2.2.	Proračun novih KPI	66
4.	NOVI MODEL GODIŠNJE RASPODELE INTENZITETA KIŠE	70
4.1.	Analiza podataka Bolton eksperimenta i usvajanje tolerancija	70
4.2.	Opis algoritma za realizaciju novog metoda	75
5.	IMPLEMENTACIJA NOVOG METODA I NUMERIČKI REZULTATI	84
5.1.	Rezultati simulacije godišnje raspodele intenziteta kiše	86
5.2.	Implementacija analize na fizičkom sloju i rezultati	89
5.3.	Implementacija analize na mrežnom sloju i rezultati	92
5.3.1.	Implementacija dinamičke simulacije	93
5.3.2.	Rezultati neraspoloživosti saobraćajnih zahteva	95
5.3.3.	Rezultati performansi mreže prema KPI C-OU	97
5.3.4.	Rezultati performansi mreže prema KPI C-FCD	102
6.	DISKUSIJA	106
6.1.	Definisanje ulaznih parametara	106
6.1.1.	Hidro-meteorološki parametri	106

6.1.2. Parametri saobraćajne matrice	107
6.2. Rekapitulacija rezultata	108
6.3. Pravci daljeg istraživanja.....	110
7. ZAKLJUČAK	112
8. LITERATURA	116

Spisak tabela

Tabela 3.1. Parametri radio relejnih veza	59
Tabela 3.2. Proračun kvaliteta veza prema ITU-R P530-14.....	59
Tabela 5.1. Parametri pojedinačnih veza.....	85
Tabela 5.2. Rezultati simulacije RR deonica na fizičkom sloju.....	91
Tabela 5.3. Analiza razlika u rezultatima simulacije i modela propagacije ITU-R P.530-14 na fizičkom sloju	91
Tabela 5.4. Vreme neraspoloživosti po saobraćajnim zahtevima i faktori poboljšanja algoritma preusmeravanja.....	96
Tabela 5.5. Kriterijum maksimalnog protoka prevaziđen u 0.001% vremena $C_{i,j}^{OU,T0,0.001\%}$	98
Tabela 5.6. Kriterijum maksimalnog protoka prevaziđen u 0.005% vremena $C_{i,j}^{OU,T0,0.005\%}$	99

Spisak slika

Sl. 2.1. OSI model sistema sa paketskom komutacijom i pozicija RR70GHz i MRR70GHz u lokalnom scenariju (a.) i globalnom scenariju (b).....	29
Sl. 2.2. Struktura MRR70GHz i primeri putanja kroz mrežu za ostvarivanje veze između jednog od ulaznih i jednog od izlaznih eksternih interfejsa	30
Sl. 2.3. Primerkomunikacije s kraja na kraj prema ITU-T Rec Y.1540 u kojoj je jedan od NS je MRR70GHz.....	32
Sl. 2.4. Parametri kapaciteta definisani prema ITU-T Y.1540	33
Sl. 2.5. Blok šema RR veze	37
Sl. 2.6. Zavisnost podužnog slabljenja usled apsorpcije u gasovima od frekvencije	38
Sl. 2.7. Podužno slabljenje usled kiše u funkciji intenziteta kiše, frekvencije i polarizacije	39
Sl. 2.8. Pozicije odabranih kišnih sonde iz Bolton eksperimenta u prostoru	45
Sl. 2.9. Merenje prostorne raspodele intenziteta kiše radarom i mrežom kišnih sonde u Bolton eksperimentu na dan 13.09.2001.	46
Sl. 2.10. Prostorna interpolacija rezultata merenja intenziteta kiše IDW metodom za kišni događaj od 13.09.2012.	47
Sl. 2.11. Izolovanje kišne ćelije na osnovu radarske slike intenziteta kiše	48
Sl. 2.12. Konturno opisivanje kišne ćelije i aproksimacija krugom	49
Sl. 2.13. Aproksimacije prostorne raspodele kiše dvodimenzionalnom analitičkom funkcijom: a.eksponencijalnom i b. Gausovskom	50
Sl. 2.15. Raspodele vektora brzine kretanja kišnih masa mereno pri ukupno 107 kišnih događaja u Bolton eksperimentu	56
Sl. 2.16. Proces rađanja i raspadanja kišne ćelije velikog intenziteta	57
Sl. 3.1. Performanse prenosa datoteka u prisustvu kišnog događaja a. za vezu A i b. za vezu B.....	61
Sl. 3.2 Ilustracija modela računarske mreže: a. struktura mreže i kapaciteti veza, b. saobraćajni zahtevi i tokovi za njihovu realizaciju, c. putanje, d. ograničenje kapaciteta	63

Sl 4.1. Izmerene CDF trenutnog intenziteta kiše na različitim sondama u Bolton eksperimentu za 2001. godinu	71
Sl 4.2. Slaganje prosečne izmerene CDF intenziteta kiše sa ITU-R preporukama	72
Sl. 4.3. Broj kišnih događaja na različitim sondama u kojima je prevaziđena vrednost praga intenziteta kiše zabeleženih u Bolton eksperimentu 2001. godine	73
Sl. 4.4. Prosečni rezultati merenja i funkcije za procenu broja kišnih događaja u kojima je prevaziđena vrednost intenziteta kiše	74
Sl 4.5. Referentne pozicije i pozicije VRG	77
Sl 4.6. Transliranje putanje kišnih ćelija iz jednog skupa referentnih ćelija	81
Sl.5.1. Topologija mreže, pozicije referentnih tačaka i VRG.....	84
Sl.5.2. Histogram raspodele intenziteta brzine kretanja kišnih ćelija.....	86
Sl.5.3. Zavisnost karakterističnog rastojanja ρ_0 od intenziteta kiše u centru kišne ćelije $R_{\max}$..	87
Sl.5.4. Histogram raspodele azimuta brzine kretanja kišnih ćelija.....	87
Sl.5.5. Simulirana godišnja raspodela intenziteta kiše	88
Sl.5.6. Simulirani broj kišnih događaja	89
Sl.5.7. Rezultati simulacije KPI C-OU za vreme integracije $T_0=1s$ za protokole usmeravanja defOSPF, OSPF sa NOPHY zaštitnim putanjama i ccrOSPF	100
Sl.5.8. Rezultati simulacije KPI C-OU za vreme integracije $T_0=10s$ za protokole usmeravanja defOSPF, OSPF sa NOPHY zaštitnim putanjama i ccrOSPF	101
Sl.5.9. Rezultati simulacije KPI C-OU za vreme integracije $T_0=60s$ za protokole usmeravanja defOSPF, OSPF sa NOPHY zaštitnim putanjama i ccrOSPF	102
Sl.5.10. Rezultati simulacije KPI C-FCD za vreme integracije $T_0=1s$ za protokole usmeravanja defOSPF, OSPF sa NOPHY zaštitnim putanjama i ccrOSPF.....	103
Sl.5.11. Rezultati simulacije KPI C-FCD za vreme integracije $T_0=10s$ za protokole usmeravanja defOSPF, OSPF sa NOPHY zaštitnim putanjama i ccrOSPF.....	104
Sl.5.12. Rezultati simulacije KPI C-FCD za vreme integracije $T_0=60s$ za protokole usmeravanja defOSPF, OSPF sa NOPHY zaštitnim putanjama i ccrOSPF.....	105

Lista skraćenica

APMZK	- adaptivni protok, modulacija i zaštitno kodovanje
ATPC	- automatska kontrola predajne snage (engl. <i>automatic transmitter power control</i>)
BER	- verovatnoća greške u prenosu (engl. <i>bit error ratio</i>)
ccr OSPF	- hipotetički idealizovani protokol usmeravanja koji reaguje preusmeravanjem na svaku promenu kapaciteta ili stanja veza u mreži (engl. <i>capacity change reroute OSPF</i>)
CDF	- kumulativna funkcija raspodele (engl. <i>cumulative distribution function</i>)
CE	- iskustvo (osećaj) korisnika (engl. <i>customer experience</i>)
CSD	- prenos podataka u mrežama sa komutacijom kola (engl. <i>circuit switch data</i>)
C-OU	- novi KPI koji predstavlja kapacitet dodeljen saobraćajnom zahtevu kada samo jedan saobraćajni zahtev koristi sve resurse mreže (engl. <i>capacity - one user</i>)
C-FCF	- novi KPI koji predstavlja kapacitet dodeljen saobraćajnom zahtevu kada su kapaciteti svih veza u mreže proporcionalno fer raspodeljeni između svih saobraćajnih zahteva (engl. <i>capacity - fair capacity distribution</i>)
DEXCELL	- model kišne ćelije sa dvostrukim eksponencijalnim profilom (engl. <i>double exponential rain cell</i>)
def OSPF	- protokol usmeravanja paketa OSPF sa podrazumevanim vrednostima parametara (engl. <i>default OSPF</i>)
DRRL	- digitalna radio-relejna veza (engl. <i>digital radio relay link</i>)
E2E	- s kraja na kraj (engl. <i>end to end</i>)
EIGRP	- protokol usmeravanja EIGRP (engl. <i>enhanced interior gateway routing protocol</i>)
ER	- ivični usmerivač (engl. <i>edge router</i>)
ETSI	- European Telecommunication Standard Institute
EXCELL	- model kišne ćelije sa eksponencijalnim profilom (engl. <i>exponential rain cell</i>)

FER	- verovatnoća pogrešno primljenih paketa (engl. <i>frame error ratio</i>)
FTP	- protokol za prenos datoteka (engl. <i>file transfer protocol</i>)
GACELL	- model kišne ćelije sa Gausovskim profilom (engl. <i>Gaussian rain cell</i>)
HDRP	- hipotetička digitalna referentna linija (engl. <i>hypothetical digital reference path</i>)
HYCELL	- model kišne ćelije sa hibridnim profilom (engl. <i>hybrid rain cell</i>)
HTTP	- hyper text transfer protocol
IDW	- aproksimacija sa težinskim faktorima inverzno proporcionalnim rastojanju (engl. <i>inverse distance weighting</i>)
IP	- Internet Protocol
IPDT	- vreme kašnjenja IP paketa (engl. <i>IP delay time</i>)
IPDV	- varijacija kašnjenja IP paketa (engl. <i>IP delay variation</i>).
IPLR	- stepen gubitaka IP paketa (engl. <i>IP packet loss ratio</i>)
KPI	- ključni indikator performansi (engl. <i>key performance indicator</i>)
LS	- stanje veza (engl. <i>link state</i>)
MAN	- računarska mreža na nivou grada (engl. <i>metropolitan area network</i>)
ML	- maksimalna verodostojnost (engl. <i>maximum likelihood</i>)
MPLS	- protokol usmeravanja paketa MPLS (engl. <i>multiprotocol label switching</i>)
MRR70GHz	- računarska mreža sa usmerivačima povezanim radio-relejnim vezama iznad 70GHz
NOPHY	- algoritam generisanja zaštitne putanje (engl. <i>no physical layer</i>)
NS	- segment mreže(engl. <i>network segment</i>),
NSE	- skup segmenata mreže(engl. <i>network section ensemble</i>)
OSI	- slojeviti model komunikacija (engl. <i>open system interchange</i>)
OSPF	- protokol usmeravanja paketa OSPF (engl. <i>open shortest path first</i>)
OSPF+NOPHY	- modifikovani OSPF koji pored glavne putanje za realizaciju svakog saobraćajnog zahteva koristi i rezervnu putanju generisanu po NOPHY algoritmu
PD	- diverzitet putanje (engl. <i>path diversity</i>)
PSD	- prenos podataka u mrežama sa komutacijom paketa (engl. <i>packet switch data</i>)
QoS	- kvalitet servisa (engl. <i>quality of service</i>)
RCD	- prečnik kišne ćelije (engl. <i>rain cell diameter</i>)

RIP	- protokol usmeravanja RIP
RR	- radio relejni
RR70GHz	- Radio-relejna veza iznad 70GHz
RRG	- kišna sonda sa brzim odzivom (engl. <i>rapid rain gauge</i>)
SGRPK	- simulacija godišnje raspodele parametara kiše
TBRG	- kišna sonda sa prelivajućim kontejnerima (engl. <i>tipping bucket rain gauge</i>)
VOIP	- prenos govora preko IP (engl. <i>voice over IP</i>)
VRG	- virtualna kišna sonda (engl. <i>virtual rain gauge</i>)
VTC	- video telekonferencija (engl. <i>video teleconference</i>)

Lista promenljivih

$A_{0,01}$	- slabljenje usled kiše prevaziđeno u 0.01% vremena [dB]
a_{FM}	- margina za feding [dB]
a_{FMRi}	- margina za feding za kapacitet radio relejne veze C_{RRI} [dBm]
a_G	- slabljenje gasova i vodene pare [dB]
A_p	- slabljenje usled kiše prevaziđeno u p procenata vremena [dB]
a_{ref}	- rastojanje između dve susedne referentne pozicije u algoritmu za generisanje kišnih ćelija [km]
a_{SP}	- slabljenje u slobodnom prostoru [dB]
$b(i,j,k)$	- koeficijent raspoređivanja za k -ti tok koji opslužuje saobraćajni zahtev $h(i,j)$
$\mathbf{cc}_{RC}(i)$	- lista promena u MRR70GHz koju izaziva i -ta kišna ćelija, $i=1,...,N_{RC}$.
$C^{OU,To}(i,j)$	- Vrednost KPI C-OUza saobraćajni zahtev od čvora i ka čvoru j integraljenog za vreme T_0 [bit/s]
$C_{i,j}^{OU,T0,p}$	- vrednostKPI C-OUza saobraćajni zahtev od čvora i ka čvoru j koja neće biti prevaziđena u p procenata vremena [bit/s]
$C_{Min}^{OU,T0,p}$	- minimalna vrednost $C_{i,j}^{OU,T0,p}$ računato po svim saobraćajnim zahtevima[bit/s]
$C_{Median}^{OU,T0,p}$	- medijalna vrednost $C_{i,j}^{OU,T0,p}$ računato po svim saobraćajnim zahtevima[bit/s]
$C_{Max}^{OU,T0,p}$	- maksimalna vrednost $C_{i,j}^{OU,T0,p}$ računato po svim saobraćajnim zahtevima[bit/s]
$C_0(e)$	- nominalni kapacitet e -te veze [bit/s]
$c(e,t)$	- trenutni kapacitet e -te veze [bit/s]
$C^{FCD,To}(i,j)$	- Vrednost KPI C-FCD za saobraćajni zahtev od čvora i ka čvoru j integraljenog za vreme T_0 [bit/s]
$C_{i,j}^{FCD,T0,p}$	- vrednost KPI C-FCDza saobraćajni zahtev koji od čvora i ka čvoru j koja neće biti prevaziđena u p procenata vremena [bit/s]
$C_{Min}^{FCD,T0,p}$	- minimalna vrednost $C_{i,j}^{FCD,T0,p}$ računato po svim saobraćajnim zahtevim [bit/s]

$C_{Median}^{FCD,T0,p}$	- medijalna vrednost $C_{i,j}^{FCD,T0,p}$ računato po svim saobraćajnim zahtevima[bit/s]
$C_{Max}^{FCD,T0,p}$	- maksimalna vrednost $C_{i,j}^{FCD,T0,p}$ računato po svim saobraćajnim zahtevima[bit/s]
$C_{Min}^{FCD,no-fading}$	- minimalna vrednost KPI C-FCD u odsustvu fedinga, pri čemu je minimum računat po svim saobraćajnim zahtevima[bit/s]
$C_{Median}^{FCD,no-fading}$	- medijalna vrednost KPI C-FCD u odsustvu fedinga, pri čemu je medijana računata po svim saobraćajnim zahtevima[bit/s]
$C_{Max}^{FCD,nofading}$	- maksimalna vrednost KPI C-FCD u odsustvu fedinga, pri čemu je maksimum računat po svim saobraćajnim zahtevima[bit/s]
C_{NS}	- kapacitet mrežne sekcije na IP nivou [bit/s]
C_{NSE}	- kapacitet skupa mrežnih sekcija koje opslužuju jedan saobraćajni zahtev [bit/s]
C_{RCtest}	- trenutni kapacitet veze u prisustvu test kišne ćelije (definicija FT_{RC} KPI) [bit/s]
C_{RRi}	- kapacitet radio relejne veze [bit/s] koji je funkcija snage prijemnog signala [bit/s]
$\delta(i,j,k,e)$	- indikator pripadnosti e-te veze putanjir(i,j,k)
d	- dužina deonice [km]
δ_{th}	- indikator prevazilaženja praga intenziteta kiše R_{th}
E	- broj radio-relejnih veza RR70GHz u mreži
f	- frekvencija [GHz]
F	- funkcija optimizacionog cilja pri određivanju C_{FCD}
FT_{RC}	- novi KPI: količina prenesenih podataka u prisustvu kišne ćelije (engl. file transfer under rain cell) [bit/s]
f_v	- funkcija gustine verovatnoće intenziteta vektora brzine kišne ćelije
$g_{\mathcal{K}}$	- podužno slabljenje usled kiše [dB/km]
g_A, g_B	- dobici antena na lokacijama A i B radio relejne veze [dBi]
$\mathbf{H}$	- matrica saobraćajnih zahteva
$h(i,j)$	- element matrice $\mathbf{H}$ [bit/s]
$\mathbf{H}_{FCD}(t)$	- matrica saobraćajnih zahteva sa proporcionalno fer raspodeljenim kapacitetima veza između svih saobraćajnih zahteva u trenutku t
$h_{FCD}(i,j,t)$	-element matrice $\mathbf{H}_{FCD}(t)$ [bit/s]
if_i	- indikator promene na fizičkom sloju u trenutku tf_i .

ir_i	- indikator reakcije mreže na promenu nA fizičkom sloju u trenutku tr_i .
e, i, j, k, l, m, n	- indeksi
ko	- koeficijent oblika kiše ćelije.
μ_{p0}	- srednja vrednost ρ_0 [km]
$n_0(t, \Delta t)$	- broj prenetih bita u vremenskom intervalu $[t, t + \Delta t]$
$N(R > R_{th})$	- broj kišnih događaja u kojima intenzitet kiše prevazilazi vrednost praga R_{th}
$N_{IO}(A)$	- broj kišnih događaja u kome je slabljenje A prevaziđeno u trajanju većem od 10s
n_b	- broj bita koji se prenos na IP nivou [bit]
n_{b0}	- maksimalni mogući broj prenetih bita na IP nivou [bit]
N_C	- broj čvorova u mreži
n_R	- snaga prijemnog signala [dBm]
N_R	- broj kišnih događaja
$N_R(k)$	- broj kišnih događaja u kojima je prevaziđena k-ta vrednost praga $R_{th}(k)$
n_{R0}	- snaga prijemnog signala u odsustvu fedinga [dBm]
N_{RC}	- broj kišnih ćelija za simulaciju godišnje raspodele intenziteta kiše
N_{RR}^{CC}	- broj kišnih ćelija koje izazivaju smanjenje kapaciteta bar jedne RR70GHz u mreži
N_{RC}^{ref}	- broj kišnih ćelija u skupu referentnih kišnih ćelija
N_{ref}	- broj referentnih pozicija u algoritmu za generisanje kišnih ćelija
n_{RTi}	- prag prijema za kapacitet radio relejne veze C_{RRi} [dBm]
$\mathbf{nr}_{RC}(i)$	- lista reakcije MRR70GHz na promene na fizičkom sloju koje izaziva i -ta kišna ćelija, $i=1, \dots, N_{RC}$.
$N_T(i, j)$	- broj tokova za opsluživanje saobraćajnog zahteva $h(i, j)$
N^{TH}	- broj karakterističnih pragova intenziteta kiše
N^{VRG}	- broj virtualnih kišnih sondi
P_{imin}	- minimalna verovatnoća u opsegu od interesa za simulaciju
P_{imax}	- maksimalna verovatnoća u opsegu od interesa za simulaciju
$p_{ref}(n)$	- verovatnoća prevazilaženja n-tog referentnog praga intenziteta kiše u algoritmu za simulaciju
p_{th}	- verovatnoća prevazilaženja praga intenziteta kiše
p_{Tx}	- izlazna snaga predajnika [dBm]

R	- intenzitet kiše [mm/h]
ρ	- rastojanje od centra kišne ćelije [km]
ρ_0	- karakteristično rastojanje od centra kišne ćelije [km], za opšti izraz kišne ćelije
ρ_0^{exp}	-karakteristično rastojanje je rastojanje od centra kišne ćelije [km], za Gausovski oblik kišne ćelije, $ko=2$
ρ_0^{Gaus}	- karakteristično rastojanje je rastojanje od centra kišne ćelije [km], za eksponencijalni oblik kišne ćelije, $ko=1$
$\rho_0^{ref}(m,j)$	- karakteristično rastojanje j -te kišne ćelije u m -tom skupu referentnih kišnih ćelija [km]
$r(i,j,k)$	- putanja kroz mrežu dodeljena toku $x(i,j,k)$
$R_{0.01}$	- intenzitet kiše pravaziđen u 0.01% vremena [mm/h]
R_{max}	- intenzitet kiše u centru kišne ćelije [mm/h]
$R_{max}^{ref}(m,j)$	- maksimalni intenzitet j -te kišne ćelije u m -tom skupu referentnih kišnih ćelija [mm/h]
R_p	- intenzitet kiše pravaziđen u p procenata vremena [mm/h]
R_{th}	- Prag intenziteta kiše [mm/h]
$R_{th}^{ref}(n)$	- n -ti referentni prag intenziteta kiše u algoritmu za simulaciju [mm/h]
Δ_R	- apsolutno odstupanje simulirane i zadate vrednosti intenziteta kiše [mm/h]
σ_{ρ_0}	- varijansa ρ_0
σ_w	- varijansa brzine kretanja kišne ćelije
t	- vreme [s]
Δt	- vremenski interval [s]
tf_i	- trenutak promene na fizičkom sloju izazvan i -tom kišnom ćelijom [s]
tr_i	- trenutak reakcije mreže na promenu na fizičkom sloju izazvanu i -tom kišnom ćelijom u trenutku tf_i [s]
T_0	- vreme integracije [s]
T_R	- vreme reakcije mreže na promenu na fizičkom sloju preusmeravanjem saobraćaja [s]
T_{RR}	- vreme reakcije mreže na promenu na fizičkom sloju preraspodeljivanjem saobraćaja [s]
θ	- azimut vektora brzine kretanja kišne ćelije [°]
$\theta^{ref}(m,j)$	- azimut brzine j -te kišne ćelije u m -tom skupu referentnih kišnih ćelija [°]

T_{th}	- vreme prevazilaženja praga intenziteta kiše R_{th} [s]
T_{th}^{ref}	- vreme prevazilaženja referentnog praga [s]
U	- iskorišćen kapacitet veze [bit/s]
v	- brzina kretanja kišne ćelije [km/h]
v_{min}	- minimalna brzina kretanja kišne ćelije [km/h]
$v^{ref}(m,j)$	- intenzitet brzine j-te kišne ćelije u m-tom skupu referentnih kišnih ćelija [km/h]
v_x, v_y	- komponente brzine kišne ćelije paralelne x i y osi pravougaonog koordinatnog sistema [km/h]
$x(i,j,k)$	- k-ti tok za opsluživanje saobraćajnog zahteva $h(i,j)$ [bit/s]
x_c, y_c	- trenutne koordinate centra kišne ćelije u pravougaonom koordinatnom sistemu [km]
x_o, y_o	- koordinate početne pozicije centra kišne ćelije [km]
$x^{ref}(m,j), y^{ref}(m,j)$	- koordinate j-te kišne ćelije u m-tom skupu referentnih kišnih ćelija [km]
x_{ref}, y_{ref}	- koordinate koje pripadaju putanji kretanja kišne ćelije [km]
x_{vrg}, y_{vrg}	- koordinate kišne sonde u pravougaonom koordinatnom sistemu [km]
Z	- reflektivnost prostora za radarski signal [km]

Rezime

U ovoj disertaciji predložen je novi metod za analizu performansi računarskih mreža kod kojih su usmerivači povezani radio-relejnim vezama u frekvencijskom opsegu iznad 70GHz. U ovom frekvencijskom opsegu dominantan uzročnik fedinga je slabljenje usled kiše, koje je proporcionalno intenzitetu kiše.

U cilju smanjenja neraspoloživosti veza na nivou jedne radio-relejne veze primenjena je tehnika adaptivnog protoka, modulacije i zaštitnog kodovanja koja omogućava kompromis između dozvoljene snage prijemnog signala i kapaciteta radio-relejne veze. Budući da je ovaj metod primenjen na nivou hardvera radio-relejnog uređaja može se smatrati da je reakcija na promenu snage prijemnog signala praktično trenutna. Bez obzira na primenjenu metodu zaštite saobraćaja, ona nije dovoljna da u potpunosti eliminiše uticaj slabljenja usled kiše te i dalje postoji određeni procenat vremena u kome je veza neraspoloživa. Postojeće metode analize performansi omogućavaju samo određivanje procenta vremena u kome veza može imati dati kapacitet, što ne daje dovoljno kvalitetnu sliku o iskustvu krajnjeg korisnika (engl. *customer experience*). Hidro-meteorološke analize kiše ukazuju da kišne mase formiraju u prostoru strukturu kišne ćelije koja se kreće nošena vetrom, što za posledicu ima varijaciju slabljenja usled kiše na radio-relejnjoj vezi, a samim tim i kapaciteta radio-relejne veze, u trajanju od nekoliko minuta. U skladu sa tim, predložen je novi metod analize performansi na nivou jedne veze u kojoj je definisan ključni indikator performansi (engl. *key performance indicator* – KPI) FT_{RC} , koji predstavlja količinu prenetih podataka za vreme trajanja uticaja jedne kišne ćelije. Dijagram zavisnosti KPI FT_{RC} od parametara kišnih ćelija daje indicaciju performansi radio-relejne veze izraženu kroz iskustvo krajnjeg korisnika.

Generalizacija opisanog pristupa na nivo cele mreže postignuta je primenom novog dinamičkog modela slabljenja usled kiše koji reprodukuje statistike kiše u periodu od godinu dana, formiranjem uprošćenog matematičkog modela računarske mreže i definicijom novih KPI C-OU i C-FCD koji simuliraju vrstu servisa i ponašanje ostalih korisnika u mreži. Ovakav pristup omogućava i simulaciju efekata konačne brzine reakcije metoda

preusmeravanja i preraspodeljivanja saobraćaja u mreži uzrokovane promenama na fizičkom sloju.

Novi dinamički model slabljenja usled kiše bazira se na formiranju modela promene prostorne raspodele intenziteta kiše na osnovu koga se računa slabljenje na svakoj od radio-relejnih veza u mreži. Prostorna raspodela intenziteta kiše modelovana je kišnim ćelijama Gausovskog profila, koje se po prostoru kreću nošene vetrom. Parametri kišnih ćelija i njihovog kretanja odabrani su tako da se na geografskom prostoru na kome je instalirana radio-relejna mreža, verno reprodukuju specificirane godišnje statistike kumulativne funkcije raspodele (engl. *cumulative distribution function* - CDF) intenziteta kiše, broja kišnih događaja u kojima je prevaziđena vrednost specificiranog praga intenziteta kiše, intenzitet vektora brzine kretanja kišnih masa i azimut brzine kretanja kišnih masa. Date statističke veličine se detektuju na skupu virtualnih kišnih sondi, pravilno raspoređenih u prostoru. Pokazano je da su odstupanja datih vrednosti na pojedinačnim sondama u odnosu na prosek manja nego u slučaju eksperimentalnih rezultata. Kao eksperimentalni rezultati korišćeni su javno dostupni sirovi podaci sa osam kišnih sondi prikupljenih u okolini grada Boltone, Velika Britanija, kontinualno u toku cele 2001. godine. Time je potvrđena verodostojnost modela. U modelu je uvedena pretpostavka da se mreža u jednom trenutku nalazi pod uticajem jedne kišne ćelije, čime se primena modela ograničava na uža geografska područja dimenzija do oko 10 x 10 km. Ovo ograničenje nema uticaja za radio-relejne mreže iznad 70GHz koje se, po pravilu, realizuju na manjem geografskom prostoru jedne urbane sredine.

Za simulaciju kišnih događaja čija je verovatnoća pojave u opsegu od interesa od tipično 0.001% do 0.1% vremena na godišnjem nivou primenom datog modela potrebno je generisati nekoliko stotina kišnih ćelija i analizirati njihov uticaj na performanse mreže. Da bi se data analiza mogla realizovati konačnim računarskim resursima uveden je uprošćen matematički model mreže. Na osnovu njega određuju se vrednosti dva KPI: kapacitet dodeljen jedinom korisniku, C-OU, i kapacitet pri proporcionalno fer raspodeljenim resursima mreže između svih korisnika, C-FCD. Različite vrste servisa se simuliraju različitim vremenima integracije u kojima se računa kapacitet dodeljen saobraćajnom zahtevu. Na taj način, vreme integracije od 1s odgovara visoko interaktivnim servisima kao što je prenos govora preko računarske mreže VoIP ili videotelekonferencija, vreme integracije od 10s odgovara manje interaktivnim servisima kao što su video i audio striming, dok vreme integracije od 60s odgovara prenosu datoteka.

Performanse mreže po KPI C-OU posmatraju se na nivou individualnih zahteva u željenim procentima vremena, kao i u formi kumulativne funkcije raspodele na godišnjem nivou za minimalnu, medijalnu i maksimalnu vrednost koja se dobija posmatrano po svim zahtevima. Na taj način se određuje godišnja raspoloživost željenog servisa u uslovima slabog opterećanja mreže. Dodatno, za usvojeno malo vreme integracije od 1s, analizom KPI C-OU se dobijaju vrednosti za raspoloživost komunikacije između dva čvorišta, što odgovara osnovnom testiranju mreže primenom zahteva za odjekom (ping).

Performanse mreže po KPI C-FCD se posmatraju u formi godišnje kumulativne funkcije raspodele za minimalnu, medijalnu i maksimalnu vrednost računatu po svim saobraćajnim zahtevima u mreži i porede sa odgovarajućim vrednostima koje mreža ima u odsustvu fedinga. Na osnovu pretpostavljenog faktora degradacije mreže sa fedingom u odnosu na mrežu bez fedinga, određuje se granica procenta vremena u kojoj je dati servis prihvatljivog kvaliteta i u opterećenoj mreži. Na osnovu dobijene vrednosti uspostavljaju se kriterijumi za dalju analizu simulacijom na nivou paketa ili testiranja u virtualnom okruženju ili na realnoj mreži. Na taj način se postiže značajna ušteda u vremenu potrebnom za analizu performansi mreže kako u postupku projektovanja, tako i kasnije u njenoj eksploataciji.

Primer proračuna KPI C-OU i C-FCD na primeru test mreže koja se sastoji od šest čvorišta sa usmerivačima, povezanih sa osam radio-relejnih veza sa skokovitim adaptivnom modulacijom od 1Gbit/s, 100Mbit/s i 10Mbit/s i centralnom frekvencijom 80GHz. Dužine deonice su od 2 do 6km. Izvršena je analiza na fizičkom sloju i na mrežnom sloju. Pretpostavljena su tri metoda za zaštitu saobraćaja sa različitim vremenima reakcije: a. standardno konfigurisan (engl. *default* - def) OSPF protokol usmeravanja, označen kao def OSPF, b. protokol usmeravanja na bazi OSPF-a sa preraspodeljivanjem saobraćaja između glavne i zaštitne putanje generisanim po NOPHY algoritmu, označen kao OSPF+NOPHY i c. hipotetički protokol usmeravanja sa trenutnom reakcijom preusmeravanja paketa po kriterijumu najkraće putanje usklađen sa trenutnim kapacitetima veza (engl. *capacity change reroute* - ccr), označen kao ccr OSPF. Pokazano je da sva tri protokola usmeravanja imaju značajne faktore poboljšanja raspoloživosti u odnosu na fiksiranu putanju kroz mrežu kakva bi se koristila u slučaju komutacije na bazi kola. Takođe je pokazano da je za ostvarenje neraspoloživosti reda veličine 0.001% vremena za visokointeraktivne servise moguća primenom ccr OSPF protokola, dok druga dva protokola imaju za red veličine lošiju raspoloživost. Za neinteraktivne servise kao što je prenos datoteka sva tri protokola ostvaruju

neraspoloživost reda veličine 0.001% pri čemu pri opterećenoj mreži postoji jednakost performansi između preusmeravanja paketa i preraspodeljivanja paketa između glavne i zaštitne putanje.

U radu su naznačeni načini za prilagođavanje ulaznih podataka lokalnim hidro-meteorološkim uslovima i vrsti saobraćajnih zahteva u konkretnoj mreži, koji se modeluju korekcijom sadržaja matrice saobraćajnih zahteva. Naznačeni su pravci daljeg istraživanja: poboljšanje verodostojnosti modela godišnje raspodele kiše za veće geografske površine, formiranje okruženja za detaljniju analizu performansi mreža za specifične servise, kao i dalji razvoj metoda zaštite saobraćaja na ovim frekvencijskim opsezima.

1. UVOD

Povezivanje usmerivača u računarskim mrežama na nivou grada (engl. *Metropolitan Area Network* - MAN) digitalnim radio-relejnim vezama (engl. *Digital Radio Relay Link* - DRRL) posebno je pogodno zbog brzine instalacije mreže [Ivanek 89][Wels 06]. Ukoliko su potrebni kapaciteti veza reda veličine 1Gbit/s, upotreba radio-relejnih veza na frekvencijskim opsezima iznad 70GHz (RR70GHz) ima posebne prednosti zbog velike usmerenosti antena malih dimenzija, što omogućava realizaciju gustih mreža. Dodatnu prednost čini to što je u mnogim zemljama upotreba ovog opsega nelicencirana, pa je cena njihove eksploatacije niska. Računarske mreže sa usmerivačima povezanim radio-relejnim vezama iznad 70GHz (MRR70GHz) mogu da budu deo infrastrukture pristupne mreže telekomunikacionih operatera, posebno u mrežama za mobilne komunikacije četvrte generacije [Dahlman 11]. One mogu da se koriste i za realizaciju funkcionalnih mreža i korporativnih mreža [Wels 06]. Glavni nedostatak RR70GHz je slabljenje usled kiše, koje ograničava dužinu jedne deonice na nekoliko kilometara [Wels 06].

Projektovanje DRRL za telekomunikacione sisteme na bazi komutacije kola (engl. *circuit switch data* - CSD) [Schwartz-87] podrazumeva proračun procenta vremena u toku godine u kome će stepen greške u prenosu (engl. *bit error ratio* - BER) biti manji od zadate vrednosti. BER je funkcija snage signala u prijemniku DRRL, koja zbog prostiranja radio-talasa varira u toku vremena [Ivanek 89]. Model prostiranja radio-talasa u DRRL detaljno je opisan u ITU-R preporuci P.530 [ITU-R Rec.P.530-14]. Na osnovu parametara DRRL kao što su: predajna snaga, dobici antene i zavisnost BER od snage prijemnog signala, upotrebom modela prostiranja se može odrediti procenat vremena u kome veza ima odgovarajući BER. Veza se smatra raspoloživom ukoliko je BER manji od granične vrednosti koja se specificira u zavisnosti od primene DRRL. Snaga prijemnog signala ispod koje se prevazilazi granična vrednost BER naziva se prag prijema DRRL. Takođe se uvodi i granična vrednost BER-a za koju se smatra da veza ima degradiran kvalitet, odnosno, krajnji korisnik oseća degradaciju kvaliteta servisa. Norme kvaliteta i raspoloživosti veze predstavljaju dozvoljene procenat vremena neraspoloživosti i degradiranog kvaliteta sa kraja na kraj hipotetičke referentne linije (engl. *hypothetical digital reference path* - HDRP) dužine 27000km definisane u ITU-T preporukama

1. UVOD

G.826 i G.827 [ITU-T G.826] [ITU-T G.827]. Za DRRL lokalnog karaktera postupak skaliranja ovih normi definisan je u ITU-R preporukama F.1668 i F.1703 [ITU-R Rec. F.1668] [ITU-R Rec. F.1703]. Specifičnost CSD sistema je što se smatra da je servis dostupan samo ukoliko je sa kraja na kraj raspoloživ pun kapacitet veze, dok je jedini način za poboljšanje kvaliteta servisa smanjenje BER-a, što se postiže na primer primenom tehnika ispravljanja greške unapred (engl. *forward error correction* - FEC) [Lin 83].

Za razliku od CSD sistema, koji kontinualno prenose podatke, sistemi sa paketskom komutacijom (engl. *packet switch data* - PSD) imaju mogućnost privremenog skladištenja paketa u redovima čekanja (engl. *queuing*), dok se ne oslobodi potrebni kapacitet veze [Pioro 04]. Dodatno, u slučaju greške u prijemu paketa može se izvršiti njegovo ponovno slanje, odnosno, ispravljanje greške unazad. Zbog toga se umesto BER za PSD sisteme definiše stepen greške u prenosu rama (engl. *frame error ratio*, FER). Za DRRL veza između BER i FER je funkcija dužine paketa i raspodele greški. U ETSI standardu EN 301 785 [EN 301 785] specificirana je ekvivalencija parametara za CSD i PSD opremu. Zahvaljujući primeni FEC, krive zavisnosti BER, odnosno FER, od snage prijemnog signala su izuzetno strme (za varijaciju nivoa prijemnog signala od 1dB izaziva promenu BER od nekoliko redova veličine) [Xiong 00], te se može specificirati generalna vrednost praga prijema. Ako prijemni signal ima veću snagu od praga prijema smatra se da DRRL ima puni kapacitet, a ako je niža onda je veza u prekidu.

Upotreba redova čekanja u predajnom lancu DRRL, koji se koriste u PSD komunikacionim sistemima, omogućava primenu kompromisa između kapaciteta veze i praga prijema. U slučaju RR70GHz, ovaj kompromis rezultuje povećanjem otpornosti sistema na slabljenje usled kiše. To se postiže upotrebom tehnika adaptivnog protoka, modulacije i zaštitnog kodovanja APMZK [Goldsmith 05]. Posledica primene APMZK je da kapacitet radio-relejne veze, koja povezuje dva usmerivača, nije konstantan već varijabilan i funkcija je snage prijemnog signala, odnosno pojave kiše. Na taj način se primenom propagacijskog modela i parametara DRRL može odrediti procenat vremena u kome će veza imati odgovarajući kapacitet.

Slabljenje usled kiše ima podužan karakter i funkcija je intenziteta kiše [ITU-R Rec. P.838-3]. Pošto kiša ne pada konstantnim intenzitetom duž cele deonice RR veze, ukupno slabljenje usled kiše se dobija integraljenjem podužnog slabljenja duž cele deonice. Merenja su pokazala da korelisanost trenutnog intenziteta kiše merena u dvema tačkama opada sa njihovim rastojanjem i da je efekat izraženiji za veće intenzitete kiše [Akimoto 04]. Imajući to u vidu, moguće je realizovati zaštitu saobraćaja tako što će se u slučaju pojave kiše velikog intenziteta, saobraćaj usmeriti po drugoj putanji, na kojoj je došlo do manje redukcije kapacita veza. Ovakav

1. UVOD

metod zaštite saobraćaja na nivou mreže naziva se diverziti putanje (engl. *path diversity* - PD, ili *route diversity*). Da bi se ostvarila prostorna razdvojenost glavne i zaštitne putanje, za realizaciju PD neophodno je da bar jedna od putanja sadrži bar dve deonice, odnosno radio-relejne veze.

Ako računarske mreže povezane DRRL imaju delimično mrežastu topologiju (engl. *partial mesh*) [Pioro 04], veza između dva čvorišta se može uvek ostvariti preko bar dve putanje. Za usmeravanje paketa po različitim putanjama koriste se protokoli usmeravanja (engl. *routing protocol*), koji proračunavaju najkraću putanju kroz mrežu, pri čemu se kao cene veze uzimaju različiti parametri kao što su: broj deonica, recipročna vrednost kapaciteta veze, opterećenje veze i sl. [Retana 99]. Posle određenog kašnjenja protokoli usmeravanja reaguju na promene u mreži.

U [Gremont 04] i [ITU-R Rec.P.530-14] na osnovu eksperimentalnih rezultata na frekvencijskim opsezima od 20 do 40GHz su predloženi metodi analize dobitka performansi PD. Dati metod bazira se na proračunu verovatnoće raspoloživosti veze kada su poznate verovatnoće raspoloživosti pojedinih segmenata i koeficijenti korelacije istovremene pojave neraspoloživosti određenih segmenata. Koeficijenti korelisanosti se računaju na osnovu topologije mreže u kojoj su identifikovana dva slučaja: a) segmenti su paralelni i prostorno razdvojeni i b) segmenti se stiču u jednoj tački. Dobra strana prikazanog metoda je što se dobijaju rezultati koji reprezentuju statistike na godišnjem nivou. Međutim, pored frekvencijskog opsega, nedostatak ovog modela je što složenost proračuna raste sa brojem mogućih alternativnih putanja kroz mrežu. U računarskim mrežama zahvaljujući protokolima usmeravanja [Retana 99] postoji vrlo veliki broj putanja, te dati metod analize nije pogodan.

U praktičnoj implementaciji potrebno je konačno vreme za detekciju stanja veze i preusmeravanje saobraćaja [Retana 99]. Ova pojava se naziva konvergencija mreže (engl. *network convergence*) i u analizi performansi mreže joj treba posvetiti posebnu pažnju. Za njenu analizu potrebna je analiza performansi u vremenskom domenu koja na osnovu promena na fizičkom nivou, odnosno slabljenja usled kiše, proračunava trenutne kapacitete veza i analizira odziv mreže na ove pojave. U [Peric IST 05] je analizirana mogućnost zaštite saobraćaja na ovaj način, tako što se koriste standardni protokoli usmeravanja kao što su RIP [RFC 1058], OSPF [RFC 2328] i EIGRP [Pepelnjak 99] i standardni načini detekcije raspoloživosti veze slanjem zahteva za odjekom (engl. *ping*) [Retana 99]. Za simulaciju dvodimenzionalne raspodele kiše korišćen je model pomerajuće kišne ćelije nošene vetrom [Bonati 99] na osnovu koga se integracijom podužnog slabljenja usled kiše [ITU-R Rec. P.838-3] dobija ukupno slabljenje na svakoj radio relejnoj vezi u mreži i proračunava njen trenutni kapacitet. Iako je analiza opisana u [Peric IST 05] sprovedena za radio-relejne veze koje koriste niži frekvencijski opseg od 26GHz,

1. UVOD

na kome je takođe slabljenje usled kiše dominantan efekat, ukazano je na veliki uticaj konačne brzine konvergencije protokola preusmeravanja na povećanje neraspoloživosti pojedinih saobraćajnih zahteva u mreži. Zahvaljujući modelima skaliranja slabljenja usled kiše sa frekvencijom [ITU-R Rec.P.530-14], na MRR70GHz se očekuje sličan efekat, uz ograničenje da geografski prostor na kome se nalazi mreža zauzima manju površinu. Prevazilaženje problema konvergencije protokola usmeravanja razmatrano je u literaturi, i sreću se dva pristupa: a) unapređivanje protokola usmeravanja [Jabbar 08] i b) preraspodeljivanje saobraćaja između glavne i zaštitne putanje [Peric IEEE CL 10] i [Peric Dr 11]. Model za analizu performansi MRR70GHz mora imati mogućnost i analize dobitka pri upotrebi ovakvih tehnika.

Za razliku od CSD servisa, u PSD mrežama, zbog primene redova čekanja, veliki uticaj na performanse kvalitet veze s kraja na krajima i ponašanje ostalih korisnika, odnosno statističke osobine saobraćaja koji oni generišu [Pioro 04]. Zbog toga je analiza performansi PSD mreža znatno složenija u odnosu na analizu performansi CSD mreža. Na primer, performanse PSD računarskih mreža na bazi Internet protokola (engl. *internet protocol* - IP) [RFC 791] opisane su parametarima kvaliteta prenosa i neraspoloživosti veze s kraja na kraj (engl. *end to end* – E2E) na globalnom nivou [Y.1540] za različite vrste servisa. Svi servisi su podeljeni u klase u okviru kojih su definisani parametri kvaliteta servisa (engl. *quality of service* - QoS). Polazna pretpostavka je definisanje kapaciteta veze, i dokle je god ponuđeni saobraćaj manji od deklarisanog kapaciteta veze s kraja na kraj, mreža bi trebalo da zadovolji QoS parametre. Kao QoS parametri definisani su kašnjenje paketa, varijacija kašnjenja paketa, procenat gubitka paketa i sl. Vrednosti ovih parametara pored kapaciteta i raspoloživosti veza koje povezuju čvorišta zavise i od disciplina u redovima čekanja i generisanog saobraćaja od strane drugih korisnika. Konkretno norme za određene parametre u funkciji QoS klasa koje zavise od vrste servisa date su u [Y.1541]. Predlozi načina kako se ostvaruju dati zahtevi dati su u [Y.1542], i napomenuto je da se u konkretnim situacijama mogu koristiti i druge metode u zavisnosti od izmerenih rezultata.

U cilju ostvarenja ITU-T Y.1540/Y.1541 zahteva, na nivou računarske mreže koja obuhvata uže geografsko područje, parametri kvaliteta servisa se mogu koristiti za definisanje ključnih indikatora performansi (engl. *key performance indicator* - KPI) računarske mreže. KPI se koriste za praćenje rada računarske mreže i optimizaciju performansi. Kao tipični KPI koriste se raspoloživost servisa, ostvarivi protoci, kašnjenja paketa i varijacije kašnjenja paketa. Način definisanja KPI za mobilne mreže dat je u [TS 132 450], koji je u ovoj disertaciji korišćen kao osnov za definisanje novih KPI prilagođenih MRR70GHz, budući da su sistemi mobilnih

1. UVOD

komunikacija jedna od ciljnih primena MRR70GHz. Analiza na nivou jedne radio-relejne veze iznad 70GHz, gde se posmatra varijacija ekvivalentnog protoka, kao KPI, za vreme uticaja pomerajućih kišnih ćelija različitih parametara opisana je u [Perić IEEE 2012]. Pokazano je da se na taj način mreže mnogo bolje predstaviti osećaj korisnika (engl. *customer experience* - CE), u odnosu na izražavanje procenta vremena u kome je prevaziđena data vrednost kapaciteta veze.

1.1. Identifikacija problema i predlog rešavanja

Za projektovanje i optimizaciju MRR70GHz potrebno je proceniti njene performanse izražene preko odgovarajućih KPI. Budući da je kapacitet veze između dva čvorišta u mreži fundamentalni parametar, na osnovu koga se kasnije izvode ostali QoS parametri, definicije posmatranih KPI vezane su za kapacitet veze između dva čvorišta. Kako je kiša dominantni uzročnik varijacije kapaciteta veza u MRR70GHz, model dvodimenzionalne raspodele intenziteta kiše treba verodostojno da reprezentuje godišnje statistike kiše. Budući da se reakcija mreže na pojave na fizičkom nivou dešava sa zakašnjenjem, potrebno je analizirati ponašanje mreže u vremenskom domenu i na osnovu njega proračunavati vrednosti KPI. Pri definisanju KPI, takođe, treba pretpostaviti generisanje saobraćaja od strane drugih korisnika.

U ovoj disertaciji usvojen je sledeći pristup analize KPI u MRR70GHz: na osnovu statistika intenziteta kiše ili slabljenja usled kiše formiraju se skupovi trenutnih vrednosti slabljenja usled kiše na svim radio-relejnim vezama. Zatim se na osnovu slabljenja određuju trenutni kapaciteti i stanja svih radio-relejnih veza u mreži i simulira odziv protokola usmeravanja za određivanje putanja kroz mrežu. Poslednji korak je da se na osnovu pretpostavljenih karakteristika saobraćajnih zahteva određuju vrednosti KPI.

1.2. Doprinos disertacije

Doprinos ove disertacije je sledeći:

Na nivou jedne RR70GHz kao novi KPI definisana je prenesena količina podataka za vreme kišnog događaja modelovanog pomerajućom kišnom ćelijom Gausovske raspodele. Posmatra se vrednost KPI u funkciji maksimalnog intenziteta kiše u centru i prečnika kišne ćelije.

Kao KPI na nivou cele MRR70GHz posmatrase kapacitet veze za realizaciju saobraćajnog zahteva između bilo koja dva čvorišta u mreži u dva slučaja: a) kad su ostali saobraćajni zahtevi jednaki nuli, te jedan saobraćajni zahtev koristi sve resurse mreže (engl. *capacity - one user - C-*

1. UVOD

OU), b) kapaciteti vezau mrežisu proporcionalno fer raspodeljeni između svih korisnika (engl. *capacity - fair capacity distribution - C-FCD*). Ovi KPI imaju praktičnu primenu za deklarisanje negarantovanog protoka na osnovu kumulativne funkcije raspodele (engl. *cumulative distribution function - CDF*) ma osnovu rezultata C-OU i garantovanog protoka na osnovu CDF C-FCD. Različite vrste servisa se simuliraju različitim vremenima integracije u okviru kojih se računaju kapaciteti dodeljeni pojedinim saobraćajnim zahtevima. Visoko interaktivni servisi kao što su VoIPi video telekonferencija [ITU H.323] simuliraju se kratkim vremenima integracije reda veličine 1s, dok se neinteraktivni servisi kao što je prenos datoteka simuliraju dugačkim vremenima integracije reda veličine 60s [RFC 959].

Formiran je model godišnje raspodele intenziteta kiše na bazi pomerajućih kišnih ćelija Gausovske raspodele, koji na nivou jedne godine simulira pretpostavljenu kumulativnu funkciju raspodele intenziteta kiše, broj kišnih događaja, kao i raspodelu azimuta i intenziteta vektora brzine kretanja kišnih masa. Ulazni podaci se mogu uzeti na osnovu meteoroloških merenja, te se upotrebom ovog modela dobija pobuda na fizičkom nivou. Zatim se na osnovu uprošćenog matematičkog modela MRR70GHz, koji uzima u obzir način usmeravanja paketa i generisanog saobraćaja drugih korisnika, proračunavaju vrednosti KPI.

1.3. Struktura disertacije

Ova disertacija je organizovana u sedampoglavlja:

U prvom poglavlju data su uvodna razmatranja, identifikovan je problem, dat je predlog njegovog rešavanja i naznačen je doprinos ove disertacije.

U drugom poglavlju dat je pregled literature. Na osnovu analize preporuka Međunarodne telekomunikacione unije (engl. *International Telecommunication Union- ITU*) i standarda Evropskog Instituta za standardizaciju u telekomunikacijama (engl. *European Telecommunication Standard Institute- ETSI*) pokazano je da su parametri kapaciteta veze i s kraja na kraj (engl. *end to end – E2E*) osnovni parametri performansi mreže. Računarske mreže iznad 70GHz predstavljaju jedan segment ovakve E2E veze i njihove performanse se mogu posmatrati na osnovu ključnih indikatora performansi. Posebna pažnja je posvećena uslovima propagacije na frekvencijskim opsezima iznad 70GHz u kojima je slabljenje usled kiše dominantna vrsta fedinga, koja uzrokuje smanjenje kapaciteta veza i pojavu njihove neraspoloživosti. Dat je pregled mera za zaštitu saobraćaja na nivou jedne radio-relejne veze i cele radio relejne mreže. Ukazano je na problem da su do sada publikovani metodi procene

1. UVOD

performansi mreža na godišnjem nivou nedovoljno efikasni u slučajevima kad postoji veliki broj mogućih putanja kroz mrežu.

U trećem poglavlju pokazano je da klasični proračun performansi jedne RR70GHz na godišnjem nivou, u okviru koga se određuje procenat vremena u kome veza ima dati kapacitet, ne daje dovoljno dobru sliku performansi koje ima krajnji korisnik ovakve veze. U cilju prevazilaženja ovih problema uveden je skup novih KPI. Na nivou jedne RR70GHz novi KPI bazira se na ukupnoj količini prenetih podataka za vreme jednog kišnog događaja, dok se na nivou cele MRR70GHz KPI baziraju na usrednjenom kapacitetu veze u vremenskom prozoru, čime se simuliraju različite aplikacije. Različita opterećenja veze simuliraju se različitim matricama saobraćajnih zahteva. Za simulaciju neopterećene mreže pretpostavlja se da jedan saobraćajni zahtev može koristiti kapacitete svih veza u mreži. Opterećena mreža se simulira tako što se pretpostavlja da svako čvorište komunicira sa svakim, a kapaciteti svih veza su proporcionalno fer raspodeljeni između svih saobraćajnih zahteva. Prikazan je proračun novih KPI na osnovu uprošćenog matematičkog modela u kome se zbog promena na fizičkom sloju menjaju kapaciteti veza, na šta posle određenog kašnjenja reaguju algoritmi preusmeravanja saobraćaja.

U četvrtom poglavlju je, u cilju određivanja godišnje raspodele novih KPI, definisan novi model za dinamičku simulaciju godišnje raspodele intenziteta kiše na geografskom prostoru na kome je instalirana MRR70GHz. Model je baziran na pomerajućim kišnim ćelijama i omogućava reprodukciju pretpostavljenih statističkih parametara padavina: kumulativnu funkciju raspodele intenziteta kiše, broja kišnih događaja, kao i raspodela pravca i smera vektora brzine kretanja kišnih masa (engl. *rain advection vector*). Tolerancije parametara modela utvrđene su na osnovu analize izmerenih podataka o intenzitetu kiše dobijenih u Bolton eksperimentu [Bolton 06]. Od ukupnog skupa kišnih sonde izdvojeno je osam kišnih sonde koje su bile u funkciji tokom cele 2001. godine. Lokacije na kojima su instalirane odabrane sonde pokrivaju prostor od oko 20x10 km u okolini grada Boltona, Velika Britanija.

U petom poglavlju dat je primer analize performansi jedne MRR70GHz koja se sastoji od šest čvorišta povezanih sa ukupno osam RR70GHz, čije su dužine deonice od 2.2 do 6km. Testirana su tri protokola preusmeravanja saobraćaja: standardno konfigurisani OSPF sa vremenom reakcije od 40s posle detekcije promene stanja veze [OSPF], protokol OSPF sa zaštitnim putanjama generisanih NODPHY algoritmom [Peric IEEE CL 10] i hipotetički protokol sa trenutnom reakcijom posle bilo koje promene na fizičkom nivou. Godišnja raspodela intenziteta kiše za područje simulirana je skupom od 768 pomerajućih kišnih ćelija, na osnovu

1. UVOD

čega je izračunata godišnja raspodela novih KPI. Na osnovu dobijenih rezultata analizirana je mogućnost test mreže za ostvarenje određenih telekomunikacionih servisa.

U šestom poglavlju data je diskusija. U prvom delu dat je pregled mogućnosti za dobijanje ulaznih parametara novog modela na osnovu raspoloživih globalnih baza dugoročnih meteoroloških podataka ERA-15 i ERA-40. U drugom delu data je rekapitulacija dobijenih rezultata. Posebna pažnja posvećena je uticaju konačnog vremena reakcije protokola usmeravanja saobraja. U trećem delu naznačeni su pravci daljeg istraživanja.

U sedmom poglavlju izvedeni su zaključci.

2. PREGLED LITERATURE

Polazeći od OSI modela komunikacije u mrežama sa paketskom komutacijom prikazane su osnove usmeravanja paketa kroz mrežu. Pokazano je dana promenu stanja veze na fizičkom nivou, mreža posle konačnog vremena reaguje preusmeravanjem paketa drugom putanjom kroz mrežu, što može predstavljati dodatni uzrok degradacije performansi računarske mreže. Kao polazna osnova za definisanje novih KPI analizirane su ITU preporuke i ETSI standardi vezani za performanse veze u računarskoj mreži sa paketskim prenosom. Pokazano je su parametri kapaciteta polazna osnova za procenu performansi računarske mreže, jer su ostali parametri važeći samo u slučaju da je ponuđeni saobraćaj manji od kapaciteta.

Analizirane su karakteristike RR70GHz kao veze između dva usmerivača. Pokazano je da se kapacitet veze može izraziti kao funkcija slabljenja usled kiše, te se promena kapaciteta veze u vremenu može dobiti na osnovu poznavanja dvodimenzionalne raspodele intenziteta kiše.

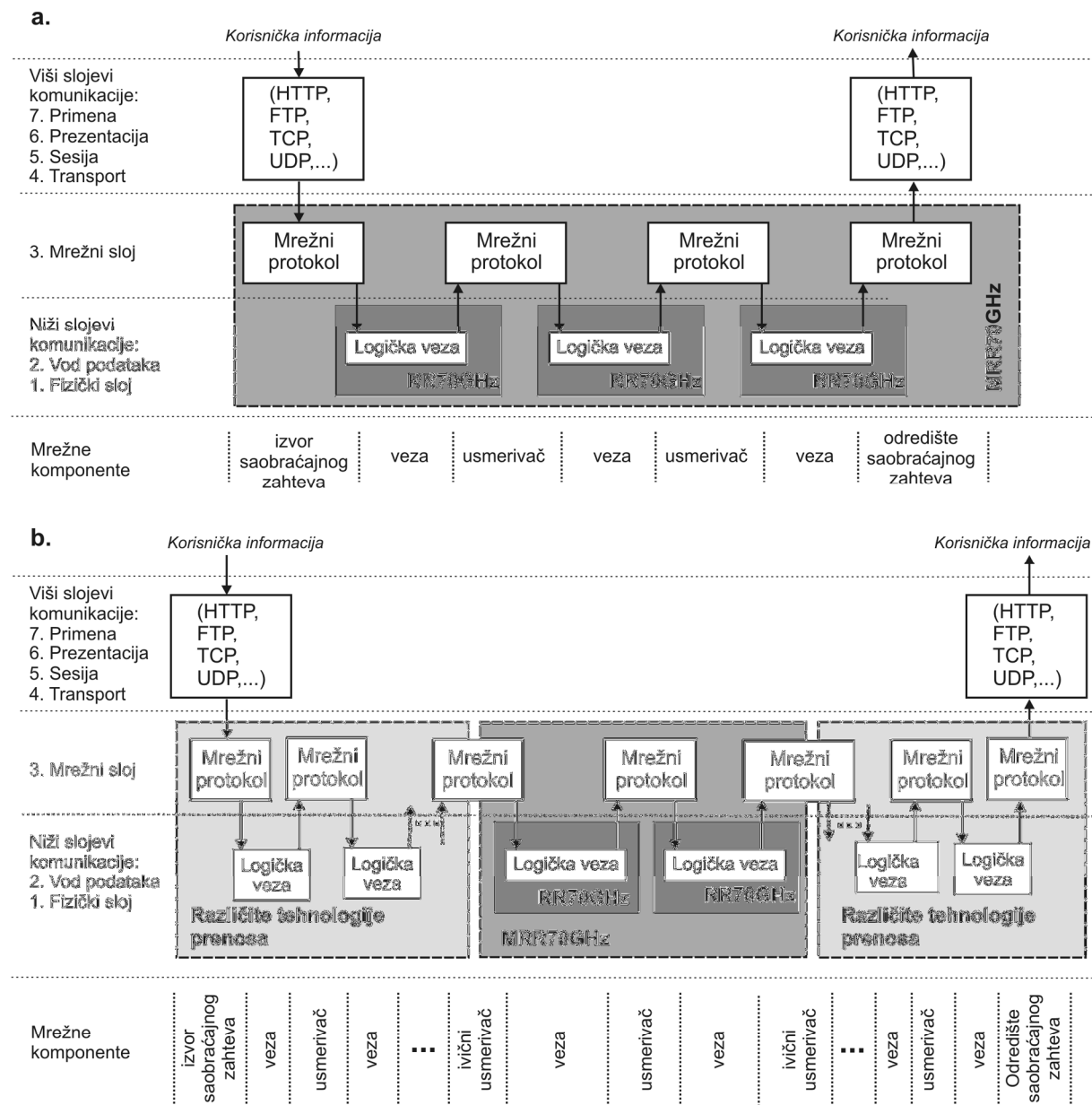
Analizom rezultata dvodimenzionalne raspodele intenziteta kiše na osnovu merenja meteorološkim radarima ili mrežom kišnih soni, utvrđeno je da se dvodimenzionalna raspodela kiše može predstaviti tzv. kišnim ćelijama, koje predstavljaju zatvorene konture u kojima intenzitet kiše prevazilazi vrednost specificiranog praga intenziteta kiše. Posmatranjem na većem prostoru uočeno je da se kišne ćelije kreću nošene vetrom i da menjaju oblik i dimenzije. Prikazani su različiti pristupi za simuliranje godišnje raspodele slabljenja usled kiše na osnovu koga se simuliraju korelisane promene kapaciteta veza u RR70GHz i analiziraju performanse mreže.

2.1. Mreže sa paketskom komutacijom

U ovoj disertaciji analizirana je primena RR70GHz u prenosnim sistemima sa paketskom komutacijom. Informacioni sadržaj veze s kraja na kraj između dva korisnika koji generišu viši slojevi OSI modela [ITU-T X.210] se na mrežnom nivou deli u paketekoji se

2. PREGLED LITERATURE

preko polaznog usmerivača (engl. *router*), usmeravaju ka odredišnom usmerivaču. Pri realizaciji veze s kraja na kraj paketi se prenose većim brojem veza i preusmeravaju u većem broju usmerivača (Sl. 2.1.).



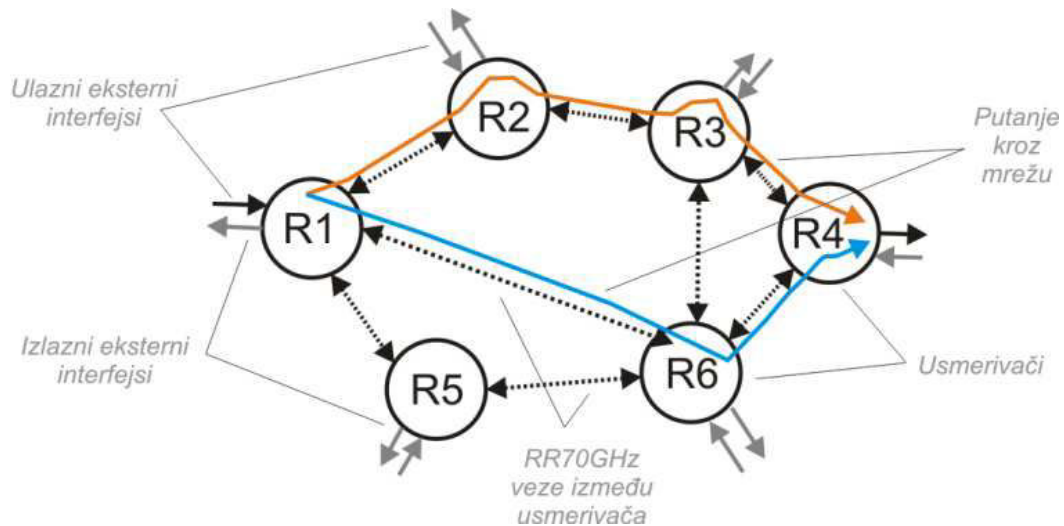
Sl. 2.1. OSI model sistema sa paketskom komutacijom i pozicija RR70GHz i MRR70GHz u lokalnom scenariju (a.) i globalnom scenariju (b)

U lokalnom scenariju primene MRR70GHz (Sl. 2.1.a) veze između usmerivača su realizovane kao RR70GHz. Na taj način RR70GHz prema OSI modelu predstavlja logičku vezu na nivou voda podataka. Kako na nivou voda podataka, tako i na mrežnom nivou način prenosa je tipa "najbolje što je moguće" (engl. *best effort*), što znači da sistem prenosa ne

2. PREGLED LITERATURE

garantuje prenos paketa bez greške kroz mrežu. Ukoliko je za datu primenu potrebno, mehanizam ponovljenog slanja paketa (engl. *retransmission*) obavljaju viši slojevi komunikacije, te ovi efekti neće biti razmatrani u ovoj disertaciji.

Imajući u vidu relativno veliki kapacitet veze RR70GHz, pored lokalnog scenarija prikazanog na Sl.2.1.a, komunikacije s kraja na kraj u kojima se korisnici nalaze na većim rastojanjima imaju globalni scenario prikazan na Sl. 2.1.b. U ovom slučaju se pored MRR70GHz paketi prenose i kroz segmente mreže u kojima su primenjene druge tehnologije prenosa. Usmerivači u kojima se povezuju MRR70GHz sa sistemima prenosa koje koriste druge tehnologije prenosa predstavljaju granicu MRR70GHz i nazivaju se ivičnim usmerivačima (engl. *edge router*), dok se usmerivači unutar jednog mrežnog segmenta nazivaju središnjim ili posrednim usmerivačima (engl. *intermediate router*).



Sl 2.2. Struktura MRR70GHz i primeri putanja kroz mrežu za ostvarivanje veze između jednog od ulaznih i jednog od izlaznih eksternih interfejsa

Primer topologije MRR70GHz prikazan je na Sl. 2.2. MRR70GHz se sastoji iz usmerivača paketa koji su međusobno povezani RR70GHz. Svaki usmerivač je opremljen eksternim dolaznim i odlaznim interfejsom, preko koga je MRR70GHz povezana sa ostalim mrežama. Svaki paket ulazi u mrežu preko ulaznog eksternog interfejsa jednog od usmerivača, ulazi u MRR70GHz, zatim se na osnovu tabela usmeravanja usmerava kroz mrežu preko određenog broja RR70GHz i posrednih usmerivača do odlaznog eksternog interfejsa odredišnog usmerivača [Retana 99]. U zavisnosti od tabela usmeravanja, pri realizaciji komutacije konkretnog paketa svaki fizički usmerivač u MRR70GHz može imati ulogu: ivičnog usmerivača, središnjeg usmerivača, odredišnog usmerivača ili ne mora

učestvovati u komutaciji konkretnog paketa. U vezi između jednog para ulaznog i izlaznog eksternog interfejsa, koji uvek pripadaju fizički različitim usmerivačima, kroz MRR70GHz može postojati više putanja, koje se biraju po određenom algoritmu kako bi se ostvarilo ravnomerno opterećivanje veza i usmerivača (engl. *load balancing*).

Trenutna raspoloživost veze, odnosno njihovo stanje (engl. *link state*) koje povezuju usmerivače testira se periodičnim slanjem test paketa (engl. *hello packets*) [Retana 99]. Periodi slanja test paketa su različiti u zavisnosti od protokola usmeravanja i iznose od nekoliko sekundi do nekoliko desetina sekundi u zavisnosti od konfigurisanog protokola usmeravanja [RFC 2328] [Pepelnjak 99]. Na osnovu stanja veza koje su direktno povezane na usmerivač, protokoli usmeravanja (engl. *routing protocols*) popunjavaju tabele usmeravanja. U zavisnosti od tipa protokola usmeravanja, definisani su različiti načini razmena informacija o stanju direktno povezanih interfejsa na dati usmerivač sa ostalim usmerivačima u mreži.

Najjednostavniji protokoli usmeravanja funkcionišu na principu vektora udaljenosti (engl. *distance vector*) tako što sa ostalim usmerivačima razmenjuju kompletne tabele usmeravanja. Primer ovakvog protokola je RIP [RFC 1058]. Zbog velike količine podataka koje je potrebno preneti, perioda razmene podataka je velika i tipično iznosi nekoliko minuta, te dato rešenje nije pogodno za mreže u kojima se dešavaju česte promene [Peric IST 05], te neće biti dalje razmatrani u ovoj disertaciji.

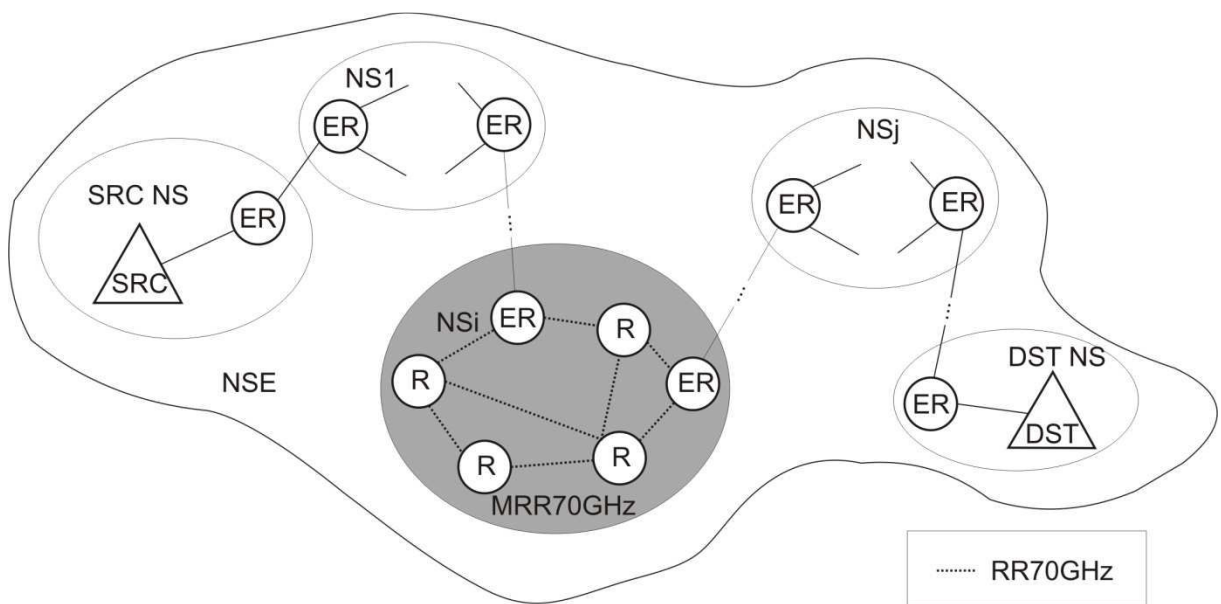
Druga vrsta protokola usmeravanja su protokoli usmeravanja na bazi stanja veza (engl. *link state* - LS) u kojima usmerivači razmenjuju samo informacije o stanjima pojedinih veza i svaki usmerivač za sebe formira sliku mreže i na osnovu algoritama najkraće putanje [Dijkstra 59] popunjava tabelu usmeravanja. Adekvatnim izborom algoritma osigurano je da svaki od usmerivača u vezi obavlja usmeravanje paketa usaglašeno sa ostalim usmerivačima u mreži te ne dolazi do pojave petlji u usmeravanju ili gubitaka paketa.

Vreme detekcije promene stanja neke od veza u mreži, slanje informacije o tome drugim usmerivačima, preračunavanje tabela usmeravanja i slanje paketa na osnovu korigovanih tabela usmeravanja je konačno i iznosi od nekoliko sekundi do nekoliko minuta u zavisnosti od protokola usmeravanja. Taj proces se naziva konvergencijom mreže i u tom periodu dolazi do neželjenih efekata kao što su gubici paketa i pojava petlji u usmeravanju. Da bi se ovaj problem prevazišao u nekim protokolima usmeravanja predstavljen je koncept rezervnih putanja, na koje se paketi usmeravaju u slučaju detekcije ispada veze. Primer ovakvog protokola usmeravanja je EIGRP [Pepelnjak 99] [Garcia 93].

Budući da MRR70GHz zbog čestih promena zahtevaju primenu LS protokola usmeravanja, metod za procenu performansi računarske mreže treba da uzme u obzir konačno vreme detekcije promene stanja veze, preračunavanja putanja kroz mrežu i mogućnost slanja paketa po višestrukim putanjama.

2.2. Zahtevane performanse računarskih mreža

U okviru ITU-T preporuke Y.1540 [ITU-T Rec.Y.1540] definisani su parametri performansi paketskog prenosa za realizaciju veze s kraja na kraj koja koristi IP protokol, kao i parametri raspoloživosti IP servisa u računarskim mrežama na globalnom nivou. Definisano je da se mreža sastoji iz više sekcija (engl. *network section* - NS). NS su međusobno povezane preko veza koje spajaju ivične usmerivače (engl. *edge router* - ER). Skup NS koji se koriste za realizaciju jedne veze s kraja na kraj označen je kao (engl. *network session ensemble* - NSE). Na osnovu date terminologije MRR70GHz predstavlja jednu NS u okviru NSE (SI 2.3.).



Sl.2.3. Primer komunikacije s kraja na kraj prema ITU-T Rec Y.1540 u kojoj je jedan od NS je MRR70GHz

U okviru parametara performansi paketskog prenosa definisan je kapacitet sekcije na IP nivou u C_{NS} , koji predstavlja maksimalni mogući broj prenetih bitan $o(t, \Delta t)$ između dva ER koji ograničavaju datu NS u vremenskom intervalu od $[t, \Delta t]$, odnosno:

2. PREGLED LITERATURE

$$C_{NS} = C_{NS}(t, \Delta t) = \frac{n_0(t, \Delta t)}{\Delta t} . \quad (2.1)$$

Širina intervala Δt u okviru koga se vrši brojanje bita zavisi od primene, odnosno vrste servisa. Njegov red veličine je od nekoliko sekundi do nekoliko minuta. U praksi ne mora biti iskorišten ukupan raspoloživ kapacitet veze s kraja na kraj, tako da se definiše iskorišćen kapacitet, faktor iskorišćenja komunikacije i preostali raspoloživ kapacitet.

Pošto E2E saobraćajni zahtev opslužuje ukupno n NS, označene kao NS_i čiji je kapacitet C_{NS_i} , $i=1, \dots, n$. NS sa najmanjim kapacitetom će predstavljati usko grlo u realizaciji veze s kraja na kraj. Zbog toga se definiše kapacitet na nivou NSE $C_{NSE}(t, \Delta t)$ kao:

$$C_{NSE}(t, \Delta t) = \min_{i=1, \dots, n} \frac{C_{NS_i}(t, \Delta t)}{\Delta t} . \quad (2.2)$$

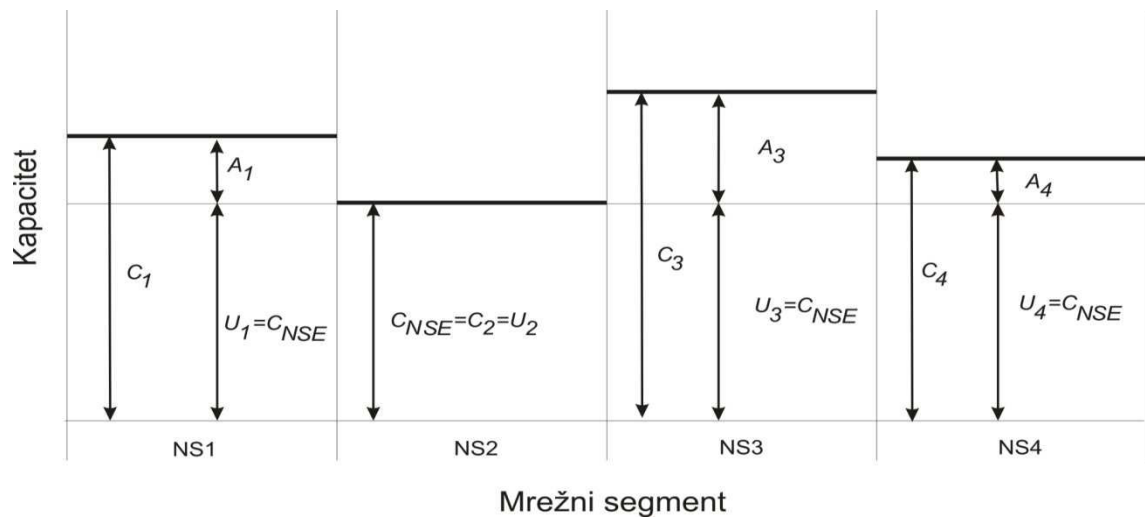
Pri praktičnoj realizaciji IP komunikacije ne može biti iskorišćen pun kapacitet veze, te je definisan i iskorišćen kapacitet veze (engl. *used capacity* - U), kao količnik broja ukupno prenetih bita $n_b(t, \Delta t)$ i širine intervala u kome se meri Δt , odnosno:

$$U(t, \Delta t) = \frac{n_b(t, \Delta t)}{\Delta t} . \quad (2.3)$$

Razlika između iskorišćenog i maksimalno mogućeg kapaciteta je raspoloživ kapacitet $A(t, \Delta t)$:

$$A(t, \Delta t) = C_{NS}(t, \Delta t) - U(t, \Delta t) . \quad (2.4)$$

Opisani parametri ilustrovani su na Sl 2.4. u kome NS2 ima najmanji kapacitet i u potpunosti je iskorišćen za realizaciju datog saobraćajnog zahteva.



Sl 2.4. Parametri kapaciteta definisani prema ITU-T Y.1540

U toku vremena dolazi do promene parametara kapaciteta veze s kraja na kraj te se definišu statistički parametri: srednja vrednost, standardna devijacija i kumulativna funkcija raspodele.

Pored parametara kapaciteta, kao parametri koji karakterišu performanse veze s kraja na kraj u ITU-T Y.1540 definisani su: kašnjenje (engl. *IP delay time* - IPDT), varijacija kašnjenja (engl. *IP delay variation* - IPDV), stepen izgubljenih paketa (engl. *IP packet loss ratio* - IPLR), stepen paketa sa greškom (engl. *IP packet error ratio* - IPER) i stepen paketa sa pomešanim redosledom (engl. *IP packet reorder ratio* - IPRR). Ovi parametri, su pored samog kapaciteta veza, zavisni i od stepena greške u prenosu, geografske udaljenosti i parametara redova čekanja u usmerivačima. U ITU-T Y.1541 [ITU-T Y.1541] definisane su norme za IPDT, IPDV, IPLR, IPER i IPRR pod pretpostavkom da je generisani saobraćaj od strane krajnjih korisnika mreže manji ili jednak deklarisanom kapacitetu koji je specificiran u ugovoru između korisnika i provajdera IP servisa. Na taj način, je za operatore telekomunikacionih mreža koje pružaju IP servis od fundamentalnog značaja odrediti parametre kapaciteta veze. Na osnovu njih se postupkom opisanim u [ITU-T Y.1541], koji se bazira na pretpostavljenoj disciplini čekanja M/D/1 [Pioro 04] mogu proceniti gornje (pesimističke) granice parametara IPDT i IPDV.

Same norme za IPDT, IPDV, IPLR, IPER i IPRR su definisane u funkciji QoS klasa. Najstrožiju klasu (Class1) predstavljaju sistemi u realnom vremenu osetljivi na varijaciju kašnjenja paketa, kao što su prenos govora (engl. *voice over IP* - VoIP) ili (engl. *video teleconference* - VTC), dok je najblaža klasa tradicionalni prenos datoteka van realnog vremena. Predloženo je da period u kome se vrši evaluacija parametara iznosi 1 minut i da u svakom od intervala bude zadovoljena. Za sisteme koji baziraju na prenosu govora, vreme se može smanjiti, ali ne na manje od 10 do 20 sekundi.

Pored parametra performansi kvaliteta IP prenosa u ITU-T preporuci Y.1540 definisana je i raspoloživost IP servisa. Period vremena se smatra neraspoloživim ako je IPLR veće od vrednosti praga c_1 . U zavisnosti of vrste servisa bira se vrednost za c_1 koji nominalno iznosi 75%. Napomenuto je da se za neke servise može specificirati i vrednost 90%, odnosno 99%, dok sa za druge vrste servisa, kao što je na primer prenos govora primenom VoIP, zahtevaju mnogo strožije vrednosti od 3% do 20%. Vreme u kome se posmatra IPLR je reda veličine od 1 do 5 min.

Za komunikaciju na nižim slojevima definisani su QoS parametri na sličan način kao za IP sloj. U okviru preporuke ITU-T Y.1561 definisani su parametri za (engl. *multiprotocol label switching* - MPLS) prenosnu mrežu [ITU-T Y.1561],

U ITU-T Y1541 definisan je metod za procenu parametara veze s kraja na kraj ukoliko su poznati parametri za svaki od NS. Na osnovu tog pristupa u ITU-T Y1542 predložena su četiri metoda za deljenje normi između pojedinih NS. Prva dva metoda su statički i pseudostatički i podrazumevaju poznavanje putanja kroz mrežu i unapred proračunavanje performansi. Zbog dinamičke prirode dodele resursa u računarskim mrežama ove metode se mogu smatrati neprimerenim. Druga dva metoda baziraju na činjenici da svaki od NS poznaje svoje parametre performansi i automatskih mehanizmima zahtevanja i pregovaranja se određuje putanja kroz mrežu koja garantuje zahtevane performanse. Bez obzira na primenjen metod potrebno je da se pri projektovanju i eksploataciji mreže eksplicitno poznaju performanse datog NS.

Kako MRR70GHz predstavlja NS, ključni parametar je poznavanje kapaciteta koji se mogu dodeliti saobraćajnim zahtevima, naravno, u periodima vremena kada je komunikacija raspoloživa. Na osnovu njih se mogu formirati ugovori sa krajnjim korisnicima mreže o QoS parametrima u funkciji željene klase IP servisa. Dalje, u toku same eksploatacije mreže, se upotrebom upravljačkih mehanizama obavlja usaglašavanje sa ostalim NS za ispunjavanje QoS parametara za dati zahtev. Zbog toga je fokus ove disertacije na određivanju performansi kapaciteta i raspoloživosti pri realizaciji veza između pojedinih čvorišta u MRR70GHz.

Jedan od načina za praćenje parametara kapaciteta je definisanje odgovarajućih KPI. Budući da su sistemi mobilnih komunikacija treće i četvrte generacije jedna od ciljnih primena MRR70GHz, KPI se mogu definisati u po ugledu na ETSI standarde za ove telekomunikacione sisteme [ETSI TS132 450]. Na taj način kao KPI definisani su parametri kapaciteta (engl. *capacity* - *C*) i raspoloživost veze (engl. *availability* - *A*). Pored promenekapaciteta zbog raspodeljivanja resursa mreže između pojedinih korisnika u MRR70GHz postoji promena kapaciteta veze s kraja na kraj koja nastaje usled redukcije kapaciteta i neraspoloživosti pojedinih veza. Zbog toga promene rezultata treba prikazivati kako po vremenu tako i po saobraćajnim zahtevima. U cilju analize različitih zahteva za QoS performanse na različitim slojevima komunikacije, kao što su Ethernet, MPLS ili IP, vremenski prozori u kojima se obračunavaju KPI treba da iznose 1s, 10s i 60s.

Kako bi se simulirala različita ponašanja korisnika u ovoj tezi predložene su definicije dva tipa KPI: pri malom i pri velikom opterećenju mreže. Za simulaciju malog opterećenja mreže definisani su KPI uz pretpostavku jednog aktivnog korisnika u jednom trenutku, dok se za simulaciju velikog opterećenja mreže predpostavlja da u jednom trenutku svako čvorište komunicira sa svakim, pri čemu su kapaciteti svih RR70GHz u mreži proporcionalno fer raspoređeni između saobraćajnih zahteva. Vrednosti KPI posmatraju se u formi CDF na godišnjem nivou. Na taj način se parametri raspoloživosti jednostavno izvode iz parametara protoka kao procenti vremena u kojima je protok jednak nuli.

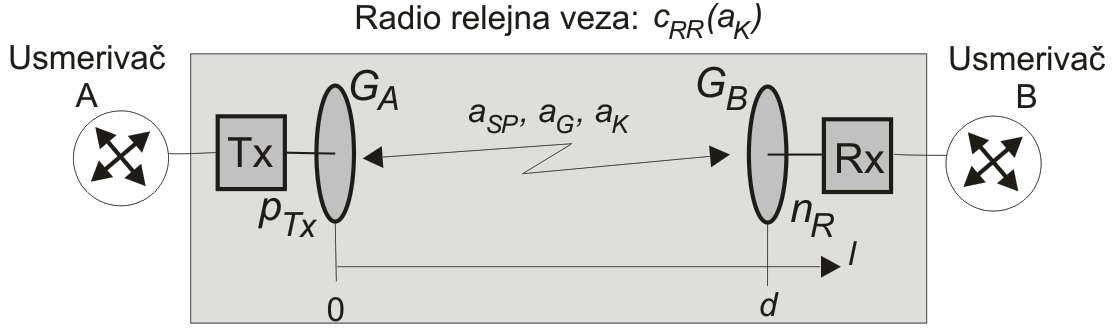
2.3. Specifičnosti radio-relejnih veza iznad 70GHz

Kao i svi radio-relejni sistemi i RR70GHz je prenosni sistem podložan fadingu. Za razliku od nižih frekvencijskih opsega, na frekvencijskim opsezima iznad 70GHz je dominantna vrsta fadinga je slabljenje usled kiše.

2.3.1. Analiza performansi jedne radio relejne veze RR70GHz

Na slici 2.5. prikazano je povezivanje usmerivača paketa na lokaciji A i lokaciji B digitalnom radio relejnom vezom. Step en greške u prenosu BER za RR70GHz, čija je širina spektra konstantna, za konkretnu vrstu modulacije i primenjenog FEC zavisi od snage prijemnog signala n_R [Xiong 00]. Zahvaljujući paketskom prenosu i primeni APMZK [Goldsmith 05], može se postići kompromis između kapaciteta veze C_{RR} i snage prijemnog signala n_R . Zbog primene FEC pri promeni prijemnog signala od samo 1dB može se postići promena verovatnoće greške od nekoliko redova veličine [Peric 09]. Adekvatnim izborom pragova i strategije za APMZK tehnologiju može se postići prilagođavanje parametara RR70GHz konkretnim uslovima prostiranja za vreme reda veličine ispod 50ms [Perros 05]. Za vreme korekcije APMZK parametara privremeno se zaustavlja prenos paketa, čime se izbegava pojava greške u prenosu i viši slojevi IP komunikacije [ITU-T X.210] ovu promenu detektuju samo kao promenu kapaciteta veze. Na taj način za RR70GHz može se definisati kapacitet veze C_{RR} kao funkcija n_R . Vrednost C_{RR} može biti jednaka i nuli i u tom slučaju je veza neraspoloživa. Ako je $C_{RR} > 0$, može se smatrati da se prenos paketa obavlja bez greške, dokle god je ponuđeni saobraćaj manji od C_{RR} .

2. PREGLED LITERATURE



Sl. 2.5. Blok šema RR veze

Da bi se odredio kapacitet veze C_{RR} potrebno je odrediti snagu signala u prijemniku n_R . U odsustvu dodatnog slabljenja usled propagacije (engl. *fading*) ona iznosi n_{R0} [dBm] koja se određuje na osnovu izraza [Ivanek 89]:

$$n_{R0} = p_{Tx} + g_A - a_{SP} - a_G + g_B, \quad (2.5)$$

gde su:

- p_{Tx} - izlazna snaga predajnika [dBm],
- g_A, g_B - dobici antena na lokacijama A i B [dBi],
- a_G - slabljenje gasova i vodene pare [dB] i
- a_{SP} - slabljenje u slobodnom prostoru [dB].

Slabljenje u slobodnom prostoru a_{SP} [dB] potiče od širenja talasnosog fronta i za opsege 70GHz najpogodnije se opisuje izrazom:

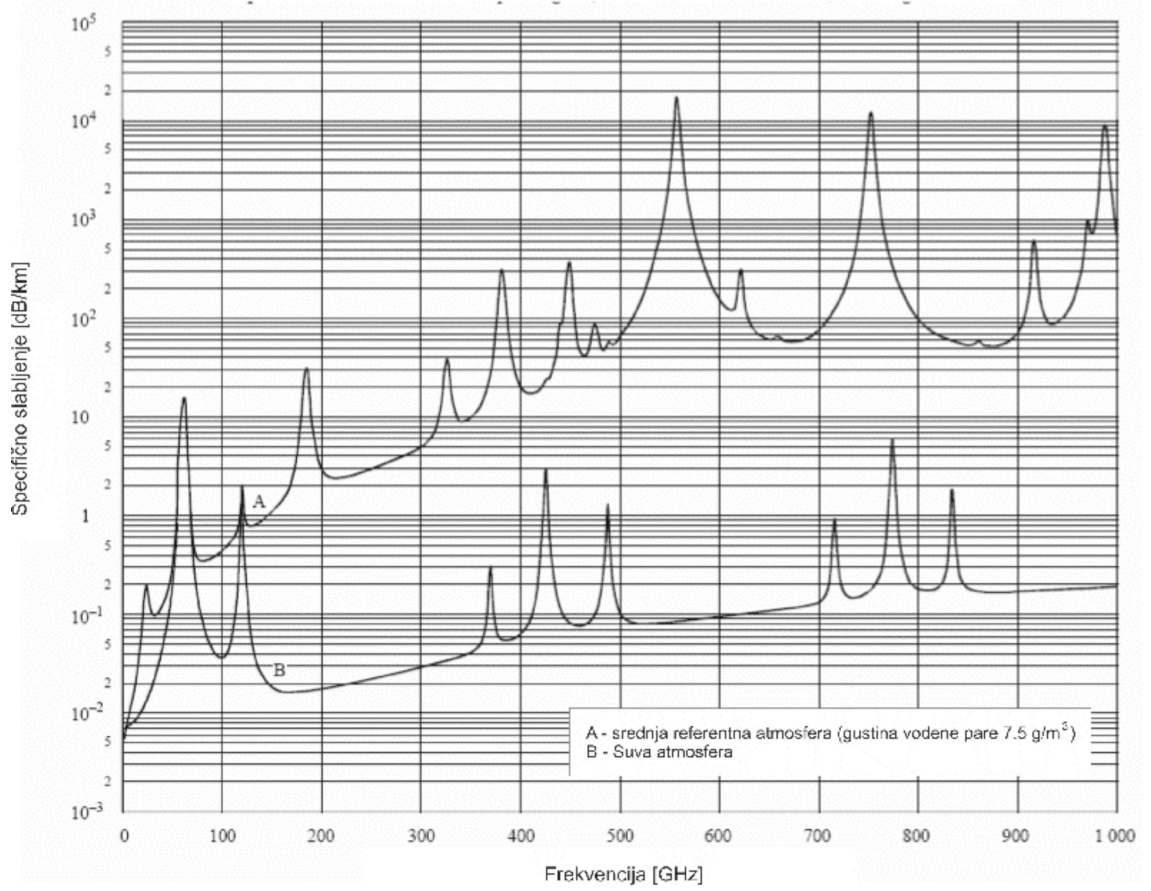
$$a_{SP} = 92.4 + 20\log_{10} d + 20\log_{10} f, \quad (2.6)$$

gde su:

- d - dužina deonice [km] i
- f - frekvencija [GHz].

Slabljenje usled apsorpcije gasova (dominantno kiseonika) i vodene pare je funkcija frekvencije (Slika 1.4.) [ITU-R Rec. P.676]. Za standardnu gustinu vodene pare od 7.5g/m za RR70GHz može se uzeti da ona iznosi 0.5dB/km.

2. PREGLED LITERATURE



Sl 2.6. Zavisnost podužnog slabljenja usled apsorpcije u gasovima od frekvencije

Pod uticajem fedinga usled višestruke propagacije ili kiše dolazi do dodatnog slabljenja prijemnog signala a_F [dB], te snaga signala u prijemniku postaje:

$$n_R = n_{R0} - a_F . \quad (2.7)$$

Snaga prijemnog signala pri kojoj dolazi do smanjenja kapaciteta veze naziva se pragom prijema za dati kapacitet [Cioni 03]. Praktično, za jednu RR70GHz se može definisati skup svih mogućih kapaciteta $C_{RR1}, \dots, C_{RRNth}$ [Mbit/s] i odgovarajućih pragova $n_{RT1}, \dots, n_{RTNth}$ [dBm]. Ukoliko je snaga prijemnog signala manja od n_{RTNth} , kapacitet veze je jednak nuli, odnosno veza je neraspooloživa. Razlike snage prijemnog signala i pragova prijema za odgovarajući kapacitet nazivaju se marginama za feding a_{FMi} [dB], $i=1, \dots, N_{th}$:

$$a_{FMi} = n_{R0} - n_{RTi}, i = 1, \dots, N_{th} . \quad (2.8)$$

Na taj način kapacitet veze će biti:

$$C_{RR}(a_F) = \begin{cases} C_{RR1}, a_F \leq a_{FM1} \\ C_{RRi}, a_{FMi-1} < a_F \leq a_{FMi}, i = 2, \dots, N_{th} \\ 0, a_F > a_{FMNth} \end{cases} . \quad (2.9)$$

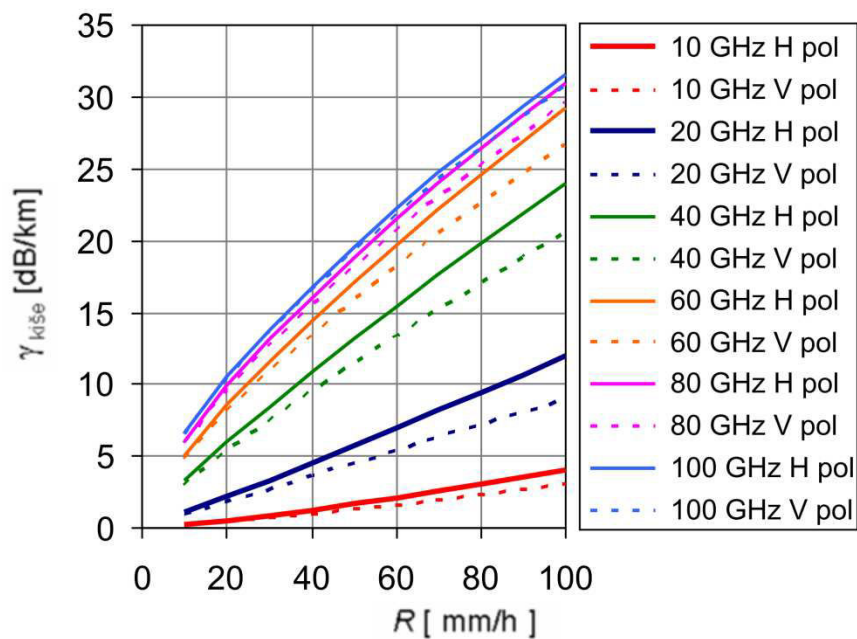
2. PREGLED LITERATURE

Dubina fedinga a_F zavisi od klimatsko-meteoroloških, reljefnih i drugih parametara vezanih za geografsku lokaciju na kojoj je instalirana RR70GHz [Ivanek 89][Šunjevarić 12]. Od interesa je odrediti procenat vremena u kome je prevaziđena vrednost određene dubine fedinga kako bi se odredio procenat vremena u kome dolazi do smanjenja kapaciteta RR70GHz. Primenom propagacijskog modela [ITU-R Rec.P.530-14], dolazi se do zaključka da na RR70GHz slabljenje uslede kiše ima za više od jednog reda veličine veći doprinos u odnosu na slabljenje usled višestruke propagacije. Na taj način se slabljenje usled višestruke propagacije može u potpunosti zanemariti.

Model podužnog slabljenja usled kiše bazira se na apsorpciji (engl. *absorption*) i raspršivanju (engl. *scattering*) na kapljicama vode, čija permitivnost je funkcija frekvencije i polarizacije radio talasa [Liebe 91]. Kao posledica toga, podužno slabljenje usled kiše γ_k [dB/km] je funkcija intenziteta kiše R [mm/h] opisana je izrazom:

$$\gamma_K = K_R \cdot R^{\alpha_R}, \quad (2.10)$$

gde su koeficijenti K_R i α_R funkcija frekvencije i polarizacije i mogu se naći u [ITU-R P.838] za frekvencije do 1THz. Na Sl 2.7. prikazan je dijagram zavisnosti γ za različite frekvencijske opsege. Tačnost ovakvog načina proračuna u funkciji dimenzija i gustine kišnih kapi detaljno je analizirana i upoređena sa rezultatima merenja u [Henderatoro 10].



Sl 2.7. Podužno slabljenje usled kiše u funkciji intenziteta kiše, frekvencije i polarizacije

2. PREGLED LITERATURE

Pošto intenzitet kiše varira duž radio-relejne deonice, ukupno slabljenje usled kiše $A_k[\text{dB}]$ se dobija integraljenjem izraza (2.10) po pravcu prostiranja radio-relejne veze ukupne dužine $d[\text{km}]$:

$$A_k = \int_0^d K_R \cdot R(l)^{\alpha_R} dl. \quad (2.11)$$

U modelu propagacije [ITU-R Rec.P.530-14] činjenica da kiša ne pada istim intenzitetom duž cele putanje modeluje se ekvivalentnim skraćivanjem putanje, koja je funkcija loknog klimatološkog parametara intenziteta kiše prevaziđenog u 0.01% vremena $R_{0.01}[\text{mm/h}]$ i dužine deonice d , te se slabljenje računa kao:

$$A_k = \gamma_k \cdot d_{\text{eff}} = \gamma_k \cdot \frac{d}{0.477 \cdot d^{0.633 \cdot \alpha_R} \cdot R_{0.01}^{0.073} \cdot f^{0.123} - 10.579 \cdot (1 - \exp(-0.024 \cdot d))}. \quad (2.12)$$

Određivanje performansi radio-relejne veze se svodi na određivanje procenta vremena u kome je prevaziđena vrednost margine za feding, te se na osnovu izraza (2.8), (2.9), (2.10) i (2.12) može odrediti kritična vrednost intenziteta kiše koja će izazvati prevazilaženje margine za feding. Na osnovu poznavanja kumulativne funkcije raspodele intenziteta kiše se dalje može odrediti procenat vremena u kome je prevaziđena rezerva za feding, o čemu se više detalja može naći u: [Crane 80] [ITU-R Rec.P.530-14] [Šunjevarić 12]. U slučaju nepoznavanja CDF intenziteta kiše za lokalno područje mogu se koristiti aproksimacije. Jedna od njih prikazana je u [ITU-R Rec.P.530-14] koja daje funkciju slabljenja $A_p[\text{dB}]$ prevaziđenog u p procenata vremena i slabljenja prevaziđenog u 0.01% vremena $A_{0.01}[\text{dB}]$ kao:

$$\frac{A_p}{A_{0.01}} = C_1 \cdot p^{-(C_2 + C_3 \log_{10} p)}, p = P(A > A_p), \quad (2.13)$$

gde su C_1 , C_2 i C_3 konstante koje su funkcije učestanosti čiji je način određivanja dat u [ITU-R Rec.P.530-14].

Parametri RR70GHz za standardizovani su u [TS 102 524] [ECC Rec. (05)07] [EN 302 217]. te se dozvoljena snaga predajnika, dobici antena, osetljivost prijemnika u funkciji modulacije nalaze u specificiranim opsezima vrednosti. Kao i na nižim frekvencijskim opsezima, očekivano je da margine za feding budu veće od 15dB, što na osnovu propagacijskog modela [ITU-R Rec.P.530-14] znači da za raspoloživosti veze u opsegu od 99.9% do 99.99% dometi RR70GHz iznose do oko 10km, u zavisnosti od klimatološko-meteoroloških karakteristika područja na kome je instalirana. Eksperimentalni rezultati

[Tjelta08][Hirata 09][Kvicera 10] su potvrdili slaganje teorijskog izraza podužnog slabljenja usled kiše na frekvencijskim opsezima iznad 70GHz, ali veza između intenziteta kiše i ukupnog slabljenja trase zahteva dodatne korekzione faktore u odnosu na model ekvivalentne dužine trase.

2.3.2. Analiza diverzitija putanja u MRR70GHz

Pošto MRR70GHz obuhvata relativno mali geografski prostor, intenzitet kiše na pojedinim deonicama je korelisan, a samim tim i slabljenje. Zbog toga je ukupni procenat neraspoloživosti cele veze iz više deonica između dva usmerivača u MRR70GHz manji od jednostavnog sabiranja neraspoloživosti individualnih RR70GHz deonica koje se koriste za njenu realizaciju. Isto tako, moguće je ostvariti smanjenje neraspoloživosti ukoliko se saobraćaj preusmeri sa veza koje su u jednom trenutku zahvaćene kišom na veze koje u tom trenutku nisu. Ovakva vrsta zaštite saobraćaja naziva se diverziti putanja.

U [Cheffena 09] su dati rezultati eksperimentalnog merenja slabljenja usled kiše za frekvencijske opsege oko 40GHz na lokacijama u Norveškoj za veze koje se stiču u jednoj tački. Predložen je model na osnovu koga se jedna veza proglašava vodećom i za nju računaju statistički parametri slabljenja u skladu sa ITU-R P.530, dok se slabljenje ostalih deonica proračunava relativno u odnosu na nju na osnovu filtriranja Gausovog procesa filtrom odgovarajućih koeficijenata koji se izводе iz statističkih parametara kiše. Sličan pristup analizi slabljenja prikazan je u [Panagopoulos 06].

U [Gremont 04] na osnovu eksperimentalnih rezultata na frekvencijskim opsezima od 20 do 40GHz je predložena analiza dobitka performansi diverzitija putanje. Ovaj metod je uz odgovarajuća proširenja standardizovan u [ITU-R Rec.P.530-14]. Dati metod se bazira na proračunu verovatnoće raspoloživosti veze ako su poznate verovatnoće raspoloživosti pojedinih segmenata i koeficijenti korelacije istovremene pojave neraspoloživosti određenih deonica. Koeficijenti korelisanosti se računaju na osnovu topologije mreže u kojoj su identifikovana dva slučaja: a) segmenti su paralelni i prostorno razdvojeni i b) segmenti se stiču u jednoj tački. Dobra strana prikazanog metoda je što se dobijaju rezultati koji reprezentuju statističke parametre na godišnjem nivou.

Pored dobitaka diverzitija putanje na godišnjem nivou, za analizu prelaznih pojava prebacivanja saobraćaja sa jedne na drugu putanju u [Hendrantoro 06] predložen je metod autoregresije za simulaciju slabljenja usled kiše. Polazna pretpostavka ovog metoda je

poznavanje skupa odmeraka slabljenja usled kiše na osnovu kojih se u kraćem vremenskom periodu od nekoliko sati predviđaju slabljenja.

Međutim, pored činjenice da je metod razvijen za frekvencijske opsege do 50GHz, nedostatak ovakvih modela je što složenost proračuna raste sa brojem mogućih alternativnih putanja kroz mrežu. U računarskim mrežama, zahvaljujući protokolima usmeravanja [Retana 99] postoji vrlo veliki broj putanja, te dati metod analize nije pogodan. Takođe, upotreba sistema za ostvarenje kompromisa između snage prijemnog signala i kapaciteta radio-relejne veze, na bazi adaptivnog protoka, modulacije i zaštitnog kodovanja, dodatno usložnjava problem analize na nivou jedne mreže, jer se broj mogućih slučajeva uvišestručuje.

Drugi pristup analize performansi je formiranje modela prostorne raspodele intenziteta kiše na geografskom području na kome je postavljena veza i na osnovu topologije mreže i modela slabljenja usled kiše opisanog u poglavlju 2.3.1. određuju se slabljenja na svakoj RR70GHz u MRR70GHz i njihovi kapaciteti. Ovaj pristup je prihvaćen u ovoj disertaciji, jer nema ograničenje u pogledu frekvencijskog opsega. Polazna tačka za njegovu primenu je formiranje modela dvodimenzionalne raspodele kiše, kako na nivou jednog kišnog događaja, tako i na godišnjem nivou.

Pored efekata slabljenja korisnog signala, slabljenje usled kiše utiče na promenu interferencije u mreži, jer koristan i interferirajući signal mogu imati različita slabljenja [Sinka 02][Panagopoulos 06]. Dodatni efekat je raspršivanje na kišnim kapima koje može reflektovati signal i izazvati dodatnu interferenciju [Enjamio 07]. Za razliku od standarda za niže frekvencijske opsege za opseg 71-76 GHz upareno sa 81-86 GHz, umesto uobičajene maksimalne, specificirana je minimalna vrednost ekvivalentne izotropne snage predajnika EIRP od 38 dBi. Na taj način se favorizuje upotreba antena velikog dobitka sa velikim potiskivanjem bočnih zračenja, čime se minimizira interferencija u mreži i omogućava da opseg bude nelicenciran ili slabo licenciran [FCC-05-45][OfW 369]. Polazeći od parametara RR70GHz datim u [TS 102 524] u [Perić 12 - OTEH] analizirani su efekti interferencije u mreži iznad 70GHz. Analiza je pokazala da se pogoršanja javljaju u manje od 10% slučajeva umerene i jake kiše, te u ovoj disertaciji efekti pogoršanja usled interferencije neće biti uzimani u obzir.

2.4. Dvodimenzionalna raspodela intenziteta kiše

Za procenu potrebne rezolucije vrednosti intenziteta kiše polazi se od tolerancija karakteristika radio-relejne opreme [TS 102 524]. Ovi zahtevi ukazuju na vrednosti koje su u opsegu od $\pm 1\text{dB}$ do $\pm 2\text{dB}$ u zavisnosti od parametra, te bi za praktičnu primenu analiza slabljenja usled kiše trebala da ima istu rezoluciju. Na osnovu dijagrama zavisnosti slabljenja usled kiše od trenutnog intenziteta kiše (Sl 2.7.) može se zaključiti da za opsege iznad 70GHz strmina krive iznosi do 0.2dB/ mm/h. Uz pretpostavku dužine deonice do 10km dolazi se do potrebne rezolucije za proračun intenziteta kiše od 0.5mm/h.

2.4.1. Merenje intenziteta kiše

Merenje intenziteta kiše u jednoj tački realizuje se kišnim sondama, te se prostorna raspodela intenziteta kiše dobija na osnovu rezultata menja mrežom kišnih soni [Enjamio 03] uz primenu različitih interpolacija [Garcia 08] [Chen 12]. Najpreciznija merenja se postižu upotrebom brzih kišnih soni (engl. *rapid rain gauge* - RRG) koje prikupljaju kišnicu i zatim propuštaju kroz kapaljku iz koje cure kišne kapi jednakih dimenzija. Trenutni intenzitet kiše se dobija jednostavnim brojanjem kišnih kapi u jedinici vremena presecanjem laserskog snopa. Rezolucija ovakve kišne sonde pri merenju trenutnog intenziteta kiše je ispod 1mm/h. Za manje precizna merenja koriste se jeftinije kišne sonde sa prelivajućim kontejnerima male zapremine (engl. *tipping bucket rain gauge* - TBRG). TBRG se sastoji od dva kontejnera male zapremine koji se naizmenično pune kišnicom i prazne. Trenutak kad se jedan kontejner napuni i punjenje prebaci na drugi naziva se tip, kao onomatopeja rada mehanizma sonde. TBRG se konstruišu tako da dimenzije otvora za prikupljanje kišnice i zapremina kontejnera odgovaraju količini padavina od 0.1 do 0.4mm kiše. Beleženjem trenutka tipa se posredno određuje intenzitet kiše.

Radarska merenja su efikasniji način za određivanje raspodele intenziteta kiše na većem geografskom prostoru, na primer nekoliko stotina kvadratnih kilometara. Merenja su bazirana na Maršal-Palmerovoj [Marshall 48] relaciji stepene zavisnosti reflektivnosti prostora Z u jednoj tački od intenziteta kiše:

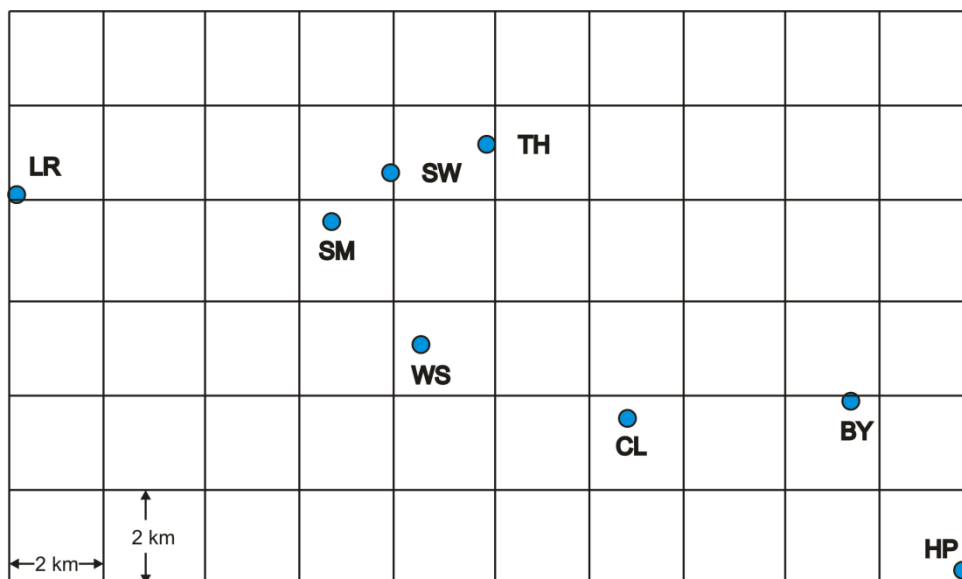
$$Z = a \cdot R^b, \quad (2.14)$$

gde koeficijenti a i b imaju vrednosti 200 i 1.6, respektivno. U cilju poboljšanja tačnosti merenja dodatna kalibracija koeficijenata a i b za dato geografsko područje može se obavljati upoređivanjem rezultata radarskog snimanja i merenja RRG [Brown 01][Forero 08].

Prostorna rezolucija radarskih merenja zavisi od usvojenih dimenzija zapreminskih jedinica za koje se određuje reflektivnost, tzv. vokseli (engl. *voxel*). Pošto se radarsko zračenje emituje iz jedne tačke, po prirodi procesa rada radara je da vokseli imaju oblik zarubljenih kupa, međutim na rastojanjima preko 10km oni se mogu aproksimirati kockom. Za analizu radio-relejnih veza od interesa je raspodela intenziteta kiše te se posmatraju radarski pikseli na zemljinoj površini, koji u blizini radarske antene imaju približno oblik trapeza, dok se na većim rastojanjima mogu aproksimirati kvadrom. Pošto MRR70GHz obuhvata mali geografski prostor na kome ne postoje značajne visinske razlike, visinska dimenzija se može zanemariti, te se posmatra samo sloj vokseli na površini zemlje. Na taj način radarska slika se transformiše u dvodimenzionalnu formu raspodele intenziteta kiše organizovanu po pikselima. Nedostatak radarskog snimanja je brzina prebrisavanja celog prostora. U standardnom skaniranju, brzina prebrisavanja iznosi od 1min do 15min u zavisnosti od konkretnog radara [Bolton 06][Zhang 09][Capsoni IJRS-09].

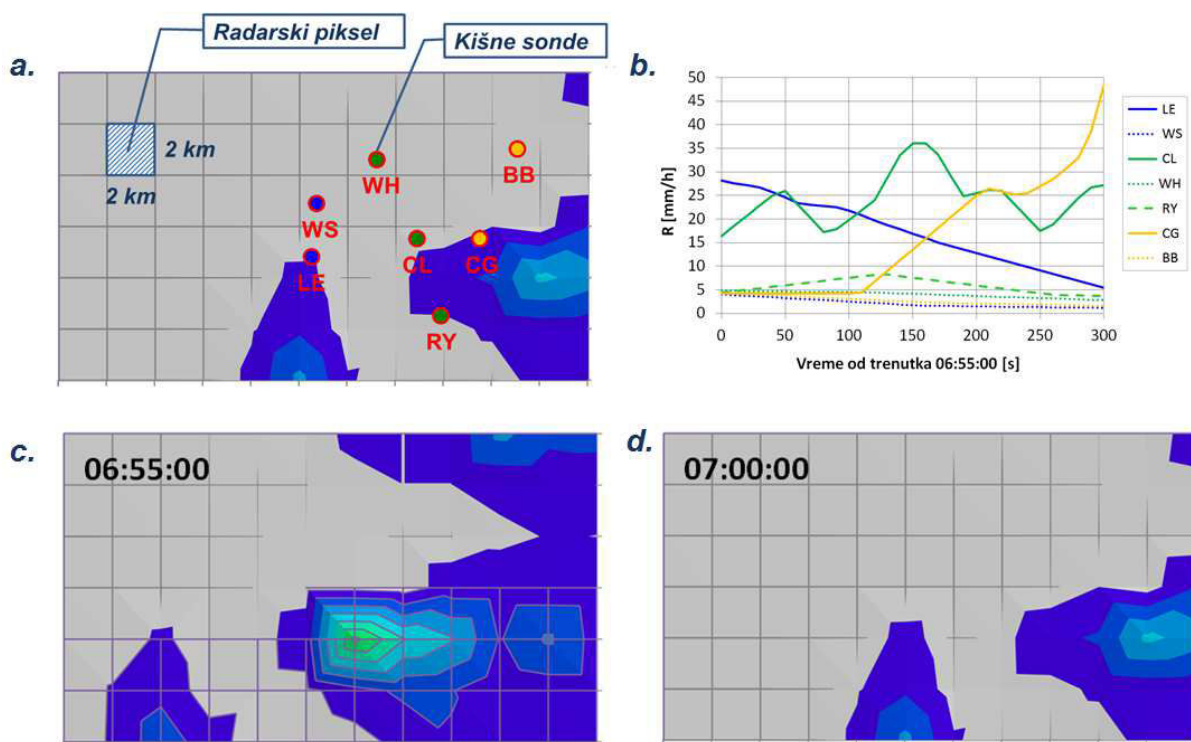
2.4.2. Određivanje dvodimenzionalne raspodele intenziteta kiše

Kao ilustracija mogućnosti određivanja dvodimenzionalne raspodele intenziteta kiše na Sl. 2.7 prikazani su rezultati merenja jednog kišnog događaja u okviru Bolton eksperimenta, čiji su podaci javno dostupni [Bolton 06]. Ovi podaci obuhvataju rezultate merenja intenziteta kiše sa ukupno 23 kišne sonde tipa TBRG i mreže nivoa prijemnog signala na pet RR veza, od kojih su dve na opsegu 17GHz, jedna na opsegu 13GHz, jedna na 23GHz i jedna na opsegu 38GHz. Data oprema je instalirana na površini od oko 20x25km u okolini grada Boltone, Velika Britanija, a podaci su beleženi periodu od 2000. do 2002. godine. Za nekoliko dana u ovom periodu date su i radarske slike datog područja dobijene sa Čibltonske opservatorije, Velika Britanija. Pošto je radar udaljen nekoliko desetina kilometara od zone eksperimenta, trapezoidalni oblik radarskih pikseli se praktično može posmatrati kao kvadratni. Zbog kvarova na pojedinim sondama, od ukupnog skupa od 23 kišne sonde izdvojeno je osam (oznake: LR, SM, SW, TH, WS, CL, BZ i HP) koje su bile u funkciji u toku cele 2001. godine, i urađena je analiza izmerenih podataka. Prostorni raspored odabranih kišnih sonde prikazan je na sl. 2.8.



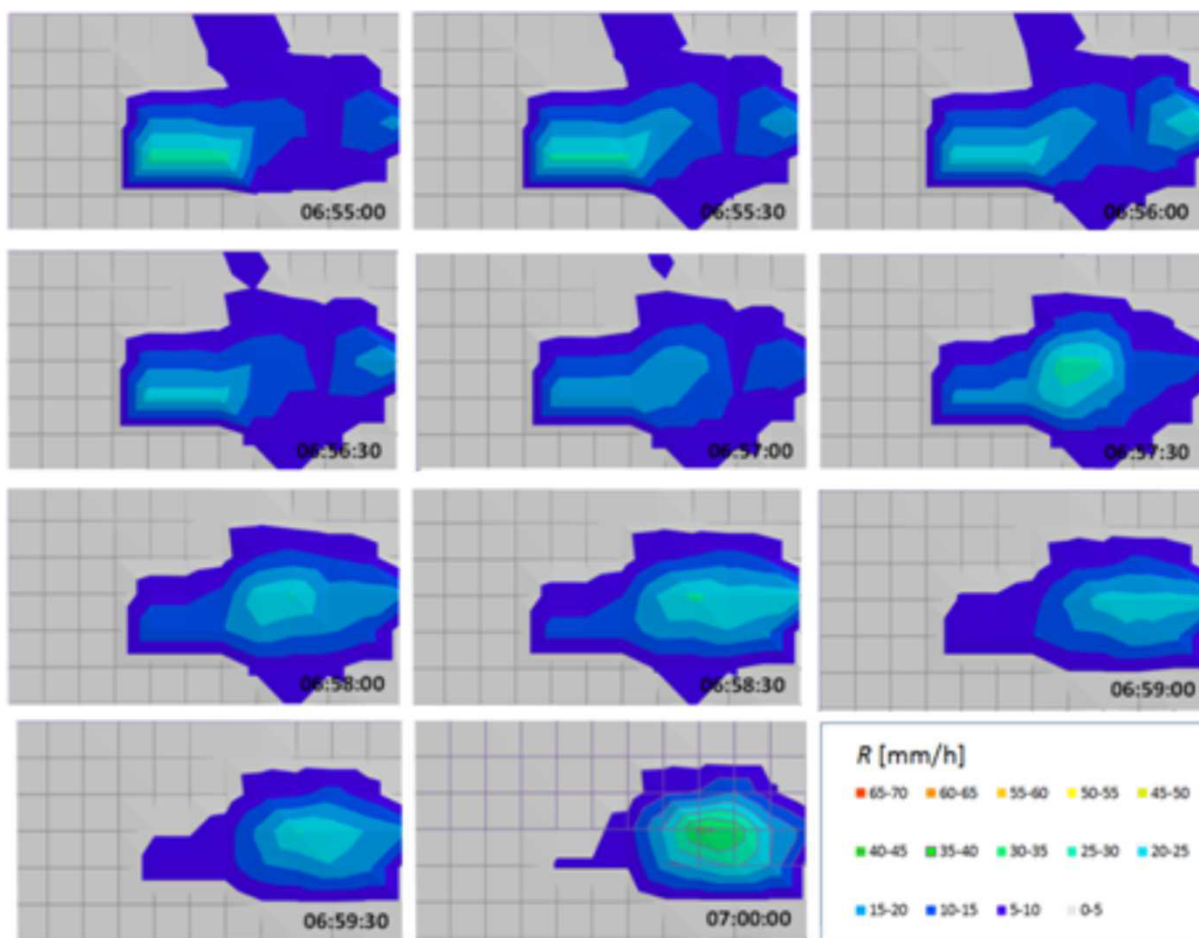
Sl. 2.8. Pozicije odabranih kišnih sonde iz Bolton eksperimenta u prostoru

Iz datog skupa podataka izdvojen je kišni događaj 13.09.2001. za koji pored podataka sa TBRG postoje i radarske slike. Na Sl. 2.9. prikazano je merenje jednog kišnog događaja u trajanju 5min između dve radarske slike na dan 13.9.2011 u periodu 6:55 do 7:00. Na Sl. 2.9 prikazano je postojanje kišnih ćelija [Bonati 99], odnosno lokacija na kojima je intenzitet kiše u centru najveći, a zatim opada ka periferiji. Radarska slika u 6:55 (Sl. 2.9.c) pokazuje postojanje dve kišne ćelije, na međusobnom rastojanju od oko 8km. "Leva" kišna ćelija je znatno većeg intenziteta i dimenzija u odnosu na "desnu". U konkretnom slučaju vreme skeniranja prostora radarom iznosi 5 minuta, te je sledeća radarska slika dobijena u 7:00 (Sl. 2.9.d). Na ovoj slici se takođe uočavaju dve kišne ćelije, jedna na sličnoj poziciji kao "desna" ćelija na Sl.2.9.c, a druga je značajno pomeren. Samo na osnovu posmatranja radarskih slika dobijenih na ovaj način ne može se detektovati šta se u proteklih 5 minuta desilo. Ovaj problem je identifikovan u literaturi [Pulsons 04] [Pathirana 02]. U [Zhang 09] je predložen metod interpolacije rezultata radarskih merenja na bazi fraktalne sinteze.



Sl. 2.9. Merenje prostorne raspodele intenziteta kiše radarom i mrežom kišnih sonde u Bolton eksperimentu na dan 13.09.2001.

Sa druge strane, analizom podataka sa TBRG (Sl. 2.9.b), na pozicijama TBRG označenih kao LE, CL, CG uočava se velika promena intenziteta kiše. Prostornom interpolacijom podataka upotrebom tehnike težinskih faktora inverzno proporcionalnih rastojanju (engl. *inverse distance weighting* - IDW) [Chen 12] sa svih raspoloživih kišnih sonde dobija se bolja vremenska slika ovog kišnog događaja (Sl. 2.10). Glavni nedostatak primene prostorne interpolacije merenja kišnim sondama je što se maksimalna vrednost intenziteta kiše u centru kišne ćelije meri precizno samo ukoliko se centar kišne ćelije nalazi iznad kišne sonde. Zbog toga je za precizna merenja strukture kiše neophodno postaviti gustu mrežu kišnih sonde.



Sl.2.10. Prostorna interpolacija rezultata merenja intenziteta kiše IDW metodom za kišni događaj od 13.09.2012.

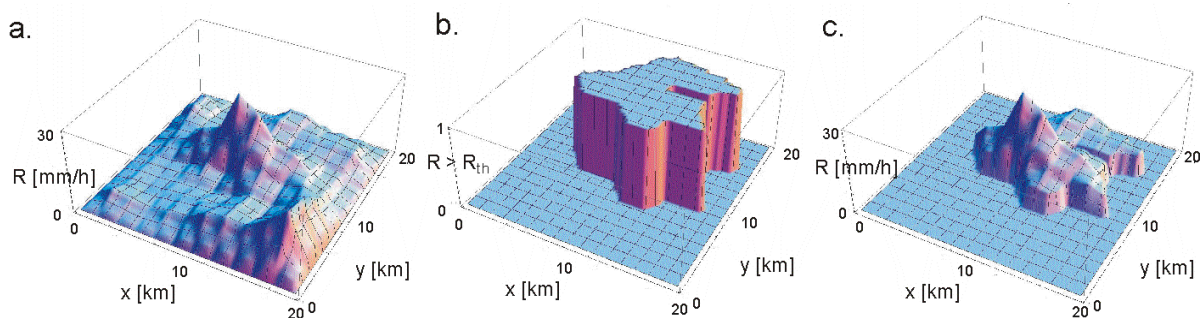
Uočava se praktično kretanje "leve" kišne ćelije u smeru zapad-istok uz promenu njenog intenziteta i dimenzija. "Desna" kišna ćelija se takođe kreće istim pravcem i smerom, očigledno nošena istim vetrom. U [Enjamio 03] je prikazana korelisanost pravca i smera kretanja kišnih ćelija sa vektorom brzine vetra na nadmorskoj visini koja odgovara atmosferskom pritisku od 750hPa i 850hPa, što odgovara nadmorskim visinama od oko 1500m, odnosno 3500m i znatno manja korelisanost sa vektorom brzine vetra iznad tla (na 10m visine). U konkretnom primeru sa Sl 2.10. brzina kretanja kišne ćelije iznosi 12m/s. U [Bonati 86] prikazan je metod za određivanje pravca i smera brzine kretanja kišnih masa na osnovu radarskih slika, dok je metod na osnovu mreže kišnih sonde prikazan u [Upton 02].

2.4.3. Identifikacija i modelovanje kišne ćelije

Kao polazna osnova za identifikaciju kišne ćelije polazi se od određivanja konture u kojoj je prevaziđena vrednost praga detektovanog intenziteta kiše. Na Sl.11. je prikazano

2. PREGLED LITERATURE

izolovanje kišne ćelije na osnovu radarske slike intenziteta kiše. Prostor zahvaćen kišom je skaniran radarom i dobijeni su podaci o trenutnom intenzitetu kiše (Sl. 2.11.a). Određuje se zatvorena kontura u kojoj je prevaziđena vrednost praga R_{th} (Sl. 2.11.b). Vrednosti R_{th} obično odgovaraju malim intenzitetima kiše od 0.5 do 5mm/h. Zatim se izdvajaju vrednosti intenziteta kiše koje se nalaze unutar konture (Sl. 2.11.c) na osnovu kojih se formira matematički model kišne ćelije.



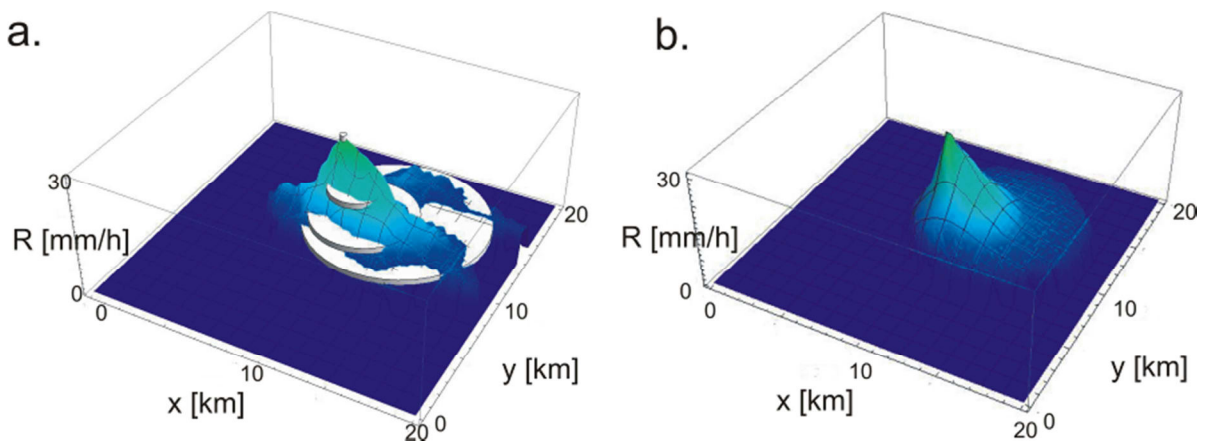
Sl. 2.11. Izolovanje kišne ćelije na osnovu radarske slike intenziteta kiše

U zavisnosti od načina nastanka postoje dve vrste kišnih ćelija: stratiformne i konvektivne [Bonati 99]. Stratiformne kišne ćelije obuhvataju veliku geografsku površinu i imaju mali intenzitet kiše koji je približno konstantan u celoj oblasti zahvaćenom kišnom ćelijom. Konvektivne kišne ćelije imaju jako izražen centar u kome je intenzitet kiše najveći i koji zatim opada ka periferiji. Tipična vrednost intenziteta kiše koji predstavlja granicu između konvektivnog i stratiformnog tipa kišne ćelije iznosi do 20mm/h. Zbog toga su za analizu performansi RR70GHz i MRR70GHz bitne samo konvektivne kišne ćelije jer one mogu uzrokovati pojavu slabljenja prijemnog signala koje smanjuje kapacitet radio-relejne veze.

U literaturi se primenjuju dva pristupa matematičkog modelovanja kišnih ćelija: a) na bazi kontura intenziteta kiše [Goldhirsh 92] [Sauvageot 99] [Enjamio 03] [Capsoni 08] [Akuon 11] i b) na bazi interpolacije analitičke funkcije [Capsoni 87] [Bonati 99] [Matricciani 00] [Sinka 02] [Feral 03] [Montopoli 07] [Towsend 10] [Luni 11].

Konturni metod se bazira na određivanju površina u kojima intenzitet kiše prevazilazi vrednost datog praga R_{th} [Goldhirsh 92]. Kontura se može aproksimirati krugom čija je površina jednaka površini konture (Sl.2.12.a.). Prečnik ovog kruga naziva se prečnikom kišne ćelije (engl. *rain cell diameter*- RCD). Zavisnost RCD od R_{th} je opadajuća funkcija. U

[Sauvageot 99] je prikazan metod za određivanje parametara eksponencijalne zavisnosti RCD i R_{th} na osnovu prosečne količine padavina na datoj teritoriji.



Sl. 2.12. Konturno opisivanje kišne ćelije i aproksimacija krugom

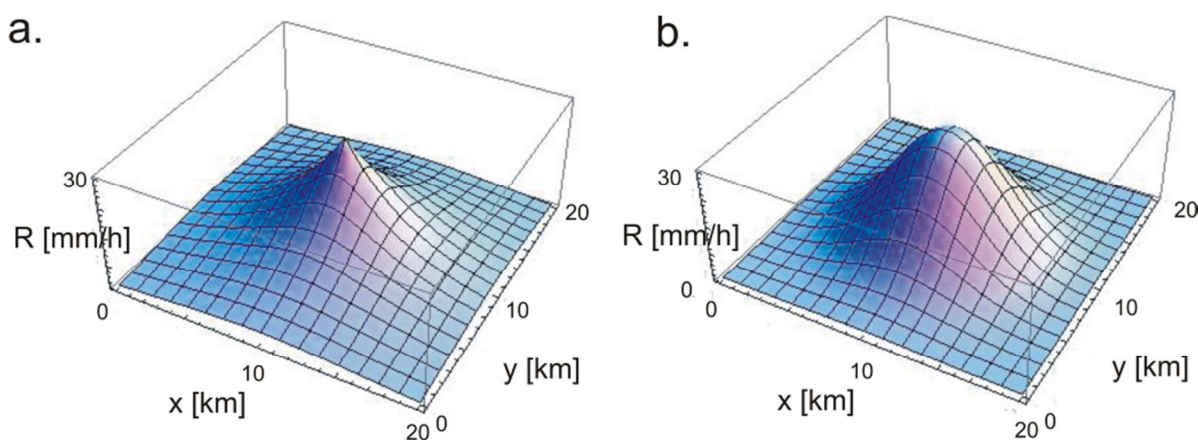
Poseban pristup analize kišnih ćelija na konturnom principu dat je u [Enjamio 03] gde je istraživao odnos maksimalnog intenziteta kiše u centru kišne ćelije i prečnika kišne ćelije definisanog kao ekvivalentni prečnik konture čiji je intenzitet kiše jednak polovini maksimalnog intenziteta kiše u centru kišne ćelije. Na taj način pojednostavljeno je praćenje dinamike kišne ćelije, odnosno njeno nastajanje i kretanje.

Kompletan profil kišne ćelije dobija se na osnovu definisanja skupa rastuće poredanih pragova $R_{th}(i)$, $R_{th}(i) < R_{th}(i+1)$, $i=1, \dots, N_{th}$ i njima pripadajućih kontura (Sl.2.12.a). Vrednost intenziteta kiše u tački unutar kišne ćelije se određuje interpolacijom (Sl. 2.12.b). Očigledno je da kontura koja odgovara pragu $R_{th}(i+1)$ mora biti unutar konture $R_{th}(i)$. Ova pojava opisana je majka-ćerka odnosom, u kome se kontura koja odgovara $R_{th}(i)$ naziva majkom kišnom ćelijom, a kontura $R_{th}(i+1)$ ćerkom kišnom ćelijom [Capsoni 08]. Po prirodi procesa padanja kiše, jedna majka kišna ćelija može imati veći broj ćerki kišnih ćelija. Na osnovu rezultata merenja u okolini Milana, Italija u [Capsoni 08] je pokazano da vrlo nisko postavljene vrednosti praga za određivanje majki kišnih ćelija od 0.5mm/h, u svega 20% slučajeva se pojavljuje dve ili više ćerki sa pragom od 1mm/h. Sa porastom vrednosti pragova i ovaj procenat se smanjuje. Ova činjenica je opravdanje drugog pristupa interpolacije monotono opadajuće dvodimenzionalne analitičke funkcije za aproksimaciju prostorne raspodele intenziteta kiše. U [Capsoni 08] su takođe prikazani i rezultati analize oblika konture, koja se može aproksimirati elipsom. Odnos dimenzija osi elipsi naziva se elipsicitet

2. PREGLED LITERATURE

kišne ćelije. Pokazano je da elipsicitet kišnih ćelija na posmatranom području za opseg pragova od 0.5mm/h do 30mm/h u 68% slučajeva se nalazi u opsegu od 0.3 do 0.7. Ekstremne vrednosti se nalaze u opsegu od 0.1 do 1.

Hronološki prvi širokoprihvaćeni model dvodimenzionalne raspodele intenziteta kiše na bazi interpolacije analitičke funkcije je EXCELL [Capsoni 87] u kome se profil intenziteta kiše modeluje eksponencijalnom funkcijom, a oblik kišne ćelije je kružni (Sl. 2.13.). Prema prikazanim rezultatima, model dobro opisuje periferiju kišne ćelije, dok se u centru kišne ćelije javljaju premašenja. Pored analize primenom EXCELL modela za potrebe hidroloških istraživanja u [Rodriguez-Iturbe 87] prikazano i modelovanje prostorne raspodele intenziteta kiše Gausovom funkcijom (Sl. 2.13.b). Ovaj model je označen je kao GACELL. U [Sinka 02] je analizirana primena oba profila za određivanje slabljenja usled kiše i pokazano je da GACELL u odnosu na EXCELL bolje opisuje profil kišne ćelije u centru kišne ćelije, ali je lošije za periferiju. Na taj način Gausovska kišna ćelija je pogodnija za opisivanje konvektivnih kišnih ćelija velikog intenziteta, kada intenzitet kiše u centru ćelije tipično prevazilazi 20mm/h.



Sl. 2.13. Aproksimacije prostorne raspodele kiše dvodimenzionalnom analitičkom funkcijom:
a.eksponencijalnom i b. Gausovskom

Opšti oblik prostorne raspodele intenziteta kiše koji pokriva i EXCELL i GACELL model dat je izrazom [Luni-11]:

$$R(\rho) = R_{\max} \cdot \exp(-(\rho/\rho_0)^{2/k_0}), \quad (2.15)$$

gde su:

R - intenzitet kiše [mm/h],

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

2. PREGLED LITERATURE

ρ -rastojanje od centra kišne ćelije,

ρ_0 -karakteristično rastojanje je rastojanje od centra kišne ćelije na kome intenzitet kišne ćelije opadne 1/e puta u

ko - koeficijent oblika kiše ćelije.

Vrednost $ko=1$ odgovara Gausovskom, $ko=2$ eksponencijalnom profilu kišne ćelije, $ko=3$ hiperekspencijalnom.

U cilju prevazilaženja ovih problema u [Feral 03] je predložen složeniji hibridni model, označen kao HYCELL koji kombinuje Gausovu i eksponencijalnu funkciju, te je centar kišne ćelije opisan Gausovom funkcijom, a periferija eksponencijalnom. Dodatno, predložen je elipsasti oblik osnove kišne ćelije koji je naznačen i u istraživanjima drugih autora [Bonati-99], [Enjamio-03], [Towsand-10]. Metod određivanja rotacije elipsaste osnove kišne ćelije na osnovu momenta inercije kišne mase prikazan je u [Towsand-10]. Publikovane vrednosti elipsiciteta zavise od lokacija na kojima su merene. Najekstremniji slučajevi publikovani su za područje u okolini Milano, Italija gde su uočene kišne ćelije sa elipsicitetom u opsegu 0.2 do 1, sa najverovatnijim vrednostima oko 0.5 [Bonati-99]. Sa druge strane kišne ćelije približno kružnog oblika, odnosno elipsiciteta jednakom 1, publikovane su za područje Barselone, Španija [Enjamio-03]. Analitički oblik HYCELL kišne ćelije [Feral-03] dat je izrazom:

$$R(x, y) = \begin{cases} R_G \cdot \exp\left[-\left(\frac{x^2}{a_G^2} + \frac{y^2}{b_G^2}\right)\right], & \text{za } R \geq R_1 \\ R_E \cdot \exp\left[-\left(\frac{x^2}{a_E^2} + \frac{y^2}{b_E^2}\right)^{1/2}\right], & \text{za } R_2 \leq R \leq R_1 \end{cases}, \quad (2.16)$$

gde su:

R_G, a_G i b_G - parametri Gausovskog dela kišne ćelije,

R_E, a_E i b_E - parametri eksponencijalnog dela kišne ćelije i

R_1 i R_2 - granice važnosti Gausovskog i eksponencijalnog dela kišne ćelije.

Očigledno je da ovaj model u potpunosti sadrži model jedne vrste raspodele dat jednačinom (2.16), te ako je $R_1=0$ dobija se elipsasti EXCELL, a za $R_1=R_2$ elipsasti GACELL.

Poredeći prikazane modele po kriterijumu intenziteta kiše u centru kišne ćelije, prosečnog intenziteta kiše, srednjeg prečnika kišne ćelije i srednjeg gradijenta kišne ćelije u Hycell na velikom uzorku kišnih ćelija snimljenih radarom na bazi kriterijuma maksimalne

2. PREGLED LITERATURE

verodostojnosti (engl. *maximum likelihood* ML) u [Montopoli 06] je predložen i dvostruki eksponencijalni model označen kao (engl. *double Excell* - DEXCELL) koji je na oko 10% kišnih ćelija daje manju grešku sa eksperimentalnim rezultatima u odnosu na eksperimentalne rezultate, čiji je analitički izraz:

$$R(x, y) = \begin{cases} R_{E1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{x^2}{a_{E1}^2} + \frac{y^2}{b_{E1}^2} \right)^{1/2} \right], & \text{za } R \geq R_1 \\ R_{E2} \cdot \exp \left[- \left(\frac{x^2}{a_{E2}^2} + \frac{y^2}{b_{E2}^2} \right)^{1/2} \right], & \text{za } R_2 \leq R \leq R_1 \end{cases}, \quad (2.17)$$

gde su:

R_{E1} , a_{E1} i b_{E1} - parametri centralne eksponencijalne kišne ćelije,

R_{E2} , a_{E2} i b_{E2} - parametri periferne eksponencijalne kišne ćelije i

R_1 i R_2 - granice važnosti periferne i centralne eksponencijalne kišne ćelije.

Pokazano je da ni jedan od modela nema generalno bolje karakteristike u odnosu na ostale modele, već da zavisi od konkretnog oblika kišne ćelije. Slične analize objavljene su i u [Pastoriza 09] za područje Španije i [Townsend 10] za područje Velike Britanije.

Za simulaciju prostorne raspodele kiše u jednom trenutku na osnovu usvojenog modela jedne kišne ćelije od suštinskog značaja je veza intenziteta kiše u centru kišne ćelije i parametara koji opisuju njene dimenzije.

Kao veza između prečnika kišne ćelije i intenziteta kiše u centru u [Bonati 99] opisan je trend obrnute proporcionalnosti prečnika kišne ćelije i inenziteta kiše u centru kišne ćelije. Kao medijalan rezultat za prečnik kišne ćelije koja predstavlja granicu intenziteta kiše datog intenziteta kiše D_m navedene su vrednosti od 1.2km za intenzitete kiše preko 50mm/h, 2km za intenzitet kiše od 30 - 50 mm/h, 4km za 20 - 30 mm/h, 8km za 14-20mm/h, 12km za 8-14mm/h i ispod 8mm/h prečnik kišne zone iznosi 20km. Očigledno je da se dobijeni rezultati ne mogu direktno interpolirati u pretpostavljeni model kišne ćelije, ali predstavljaju indicaciju zavisnosti parametra ρ_0 i R_{max} .

U [Enjamio 03] je na osnovu analize kiše upotrebom mreže kišnih sondi u Buru, Velika Britanija i Barseloni, Španija analizirani su parametri maksimalnog intenziteta kiše R_{max} i prečnika kišne ćelije u kome intenzitet kiše opadne na polovinu D_h , te imamo $D_h=1.665 \rho_0$. Prikazan je polinomijalni oblik kumulativne funkcije verovatnoće ovih parametara za

vreme kišnih događaja za obe geografske lokacije. Takođe je grafički prikazana združena verovatnoća ovih parametara koja pokazuje da generalno ćelije sa većim intenzitetima kiše imaju manji prečnik, ali da su mogući i drugačiji događaji.

Na osnovu rezultata merenja u Italiji u [Luni 11] formiran je model u kome je pokazana lognormalna funkcija parametra ρ_0 za eksponencijalni model, označena kao ρ_0^{exp} , pri čemu parametri raspodele μ i σ su funkcija maksimalnog intenziteta kiše R_{max} kao:

$$f(\rho_0^{\text{exp}}) = \frac{1}{\rho_0^{\text{exp}} \cdot \sigma_{\rho_0} \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\left(\frac{\ln(\rho_0^{\text{exp}}) - \mu_{\rho_0}}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{\rho_0}}\right)^2\right),$$
$$\mu_{\rho_0}(R_{\text{max}}) = 7.86 \cdot R_{\text{max}}^{-0.84} - 6.03 \cdot R_{\text{max}}^{-17.27} + 0.001 \cdot R_{\text{max}} - 0.19. \quad (2.18)$$
$$\sigma_{\rho_0}(R_{\text{max}}) = 33.32 \cdot R_{\text{max}}^{-0.32} - 34.22 R_{\text{max}}^{-0.35}$$

Usvajanjem pretpostavke da Gausovski i eksponencijalni model moraju imati istu količinu kiše dobijamo vezu između parametara ρ_0 za Gausovski model, označen kao ρ_0^{Gaus} i za eksponencijalni model kao:

$$\rho_0^{\text{exp}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \rho_0^{\text{Gaus}} = 0.886 \cdot \rho_0^{\text{Gaus}}, \quad (2.19)$$

te se izraz (2.18) može koristiti za generisanje odmeraka parametra ρ_0 , ako je poznata vrednost R_{max} .

Za hibridne modele kišnih ćelija do sada nisu publikovani rezultati vezani za raspodele ostalih parametara.

Za modelovanje kišnog polja veće površine od jedne kišne ćelije primenjuje se generisanje većeg broja međusobno razdvojenih kišnih ćelija, te je od posebnog značaja analiza statističkih osobina rastojanja između kišnih ćelija [Capsoni 08] [Luni 11]. Pokazano je da za usvajanje praga kišne ćelije od 5mm/h između periferije kišnih ćelija se u preko 95% slučajeva javlja rastojanje veće od nule, odnosno ne dolazi do preklapanja kišnih ćelija. Rastojanje se povećava sa porastom intenziteta kiše, te se za modelovanje uticaja kiše na MRR70GHz praktično može posmatrati samo uticaj jedne kišne ćelije u jednom trenutku.

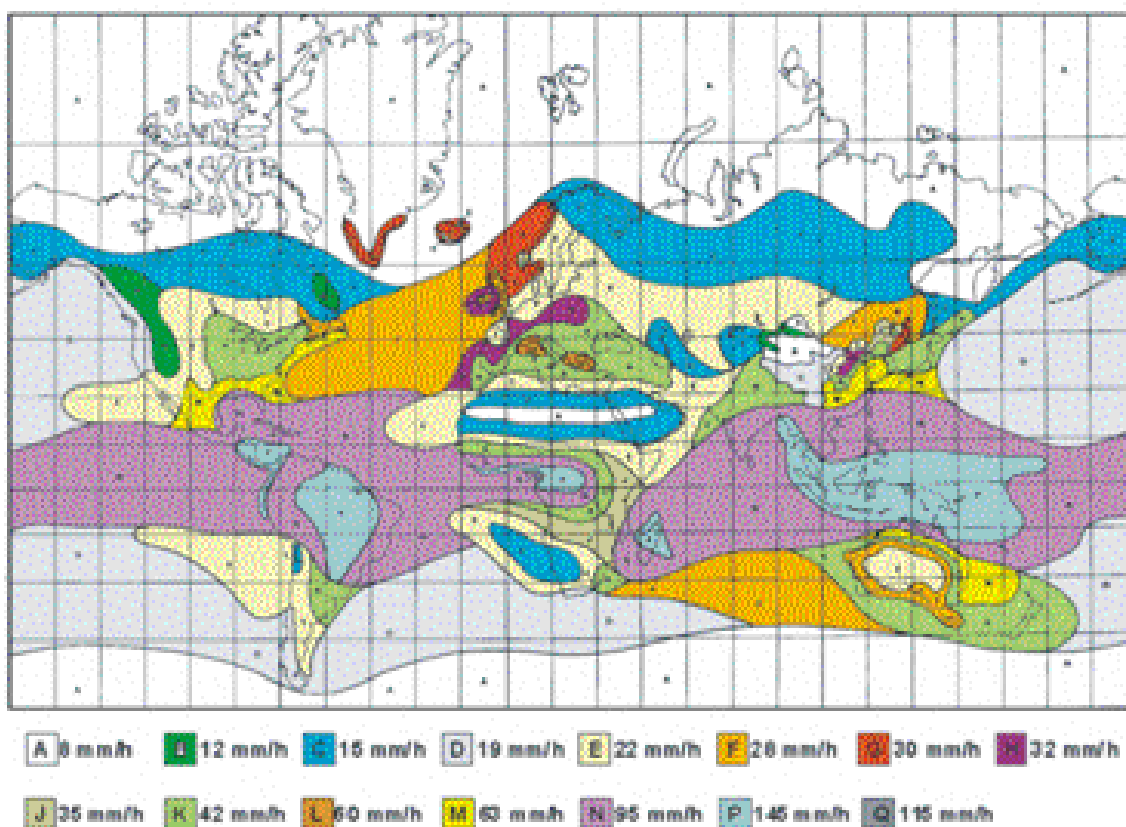
2.4.4. Metode sinteze kišnih događaja

U literaturi [Capsoni 87][Feral 03][Callaghan 04][Zhang 08][Luni 11] se pod sintezom kišnih događaja podrazumeva formiranje skupa radarskih slika kišnih događaja posmatranog prostora koji u određenom broju tačaka u prostoru zadovoljava neke od unapred definisanih

2. PREGLED LITERATURE

statističkih parametara. Date tačke u prostoru nazivaju se virtualnim kišnim sondama (engl. *virtual rain gauge- VRG*).

Najčešće korišćen parametar koji se detektuje na VRG je CDF intenziteta kiše. Podaci o CDF-u za različite geografske lokacije sa grubom prostornom rezolucijom mogu se naći u ITU-R preporuci P.837 [ITU-R P.837-1]. Mapa sveta podeljena je na klimatske zone označene od A do K (Sl.2.14). Karakteristična tačka na CDF intenziteta kiše prema ovom modelu je intenzitet kiše prevaziđen u 0.01% vremena, na osnovu koje se aproksimiraju vrednosti za ostale procenat vremena. Područje Srbije pripada klimatskoj zoni K u kojoj intenzitet kiše prevaziđen u 0.01% vremena iznosi 42mm/h.



Sl. 2.14. Podela mape sveta prema klimatskim zonama i intenzitetima kiše prevaziđenim u 0.01% vremena

Klimatske karakteristike užih geografskih područja se značajno razlikuju od grubih zona datih u ITU-R P.837, te je za precizniju procenu performansi RR veza potrebno odrediti CDF intenziteta kiše sa finijom prostornom rezolucijom, koja se može dobiti od lokalnih hidro-meteoroloških institucija.

U slučaju simulacije godišnje raspodele kiše odgovarajućim brojem radarskih slika, procenat prevazilaženja određene vrednosti intenziteta kišena virtualnoj kišnoj sondi se jednostavno računa kao količnik broja radarskih slika na kojima je prevaziđen i ukupnog broja radarskih slika. U zavisnosti od željene rezolucije CDF-a, željene tačnosti i minimalne vrednosti intenziteta kiše koja se simulira određuje se potreban broj radarskih slika koje je potrebno sintetisati. Za sintezu radarskih slika prikazane su dve metode: na bazi fraktalne sinteze [Callaghan 04][Zhang 08] i na bazi sinteze većeg broja kišnih ćelija slučajno raspoređenih po prostoru [Capsoni 87][Feral 03][Luni 11].

U [Callaghan 08] je prikazana primena ove metode za simulaciju pretpostavljene kumulativne funkcije raspodele intenziteta kiše na godišnjem nivou na geografskom prostoru Južne Engleske primenom tehnike fraktalne sinteze. Pokazano je da primena ove metode zahteva vrlo velike računarske resurse, te je posebna pažnja posvećena optimizaciji proračuna primenom smanjenja rezolucije u vremenu na jedan minut, kao i simulacije samo prostora zahvaćenog jakim konvektivnom kišom. Opisana ograničenja čine fraktalnu sintezu nepogodnom za analizu prelaznih pojava u MRR70GHz.

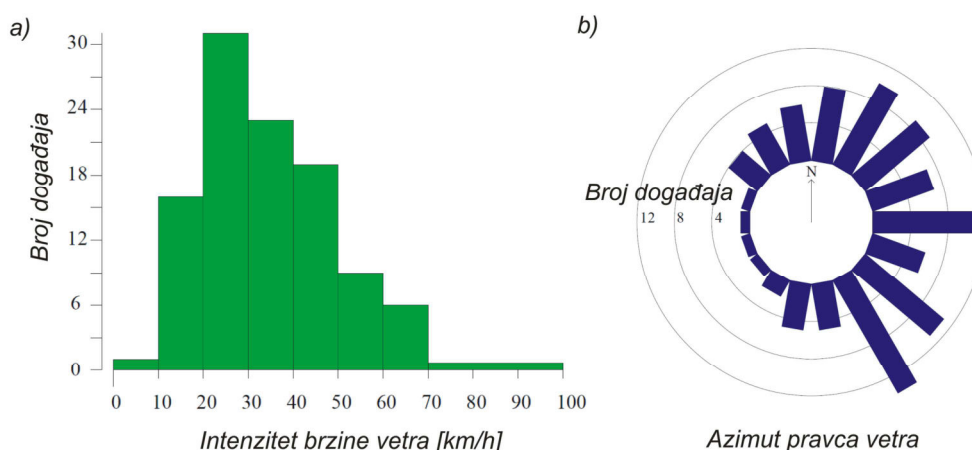
Sinteza kišnih događaja na bazi slučajno generisanih kišnih ćelija zahteva manje računarske resurse, te je pogodnija za primenu. Međutim, i ove metode imaju nedostatak da se radarske slike moraju sortirati na pogodan način tako da budu ispunjene druge statistike kao što su na primer: broj kišnih događaja, trajanje kišnih događaja i jedinstven vektor kretanja kišnih masa za vreme jednog kišnog događaja. Zbog toga se za analizu prelaznih pojava u MRR70GHz mora realizovati novi metod sinteze kišnih događaja koji opisuje i njihovu dinamiku. Jedan od načina je da se na osnovu jedne radarske slike odrede slabljenja na svim vezama u MRR70GHz, a da se zatim za određivanje prelaznih pojava primene kratkoročne metode predikcije slabljenja [van de Kamp 02]. Ovaj metod je primenjen za analizu satelitskih komunikacija u [Bousquet 04], ali metod ne garantuje očuvanje godišnjih statističkih parametara kišnih događaja.

2.4.5. Modelovanje dinamike kišnih događaja

Kao što je prikazano na Sl. 2.9 i Sl. 2.10 rezultati merenja pokazuju da se kišne mase nalaze u stalnom kretanju. Na osnovu posmatranja radarskih slika pokazano je da se kišne ćelije kreću nošene vetrom [Bonati 99]. U [Enjamio 03] je napomenuto da postoji velika korelisanost između intenziteta kretanja kišnih ćelija i vektora brzine vetra na većim visinama

koji odgovaraju atmosferskom pritisku od 700hPa (1500m) i 850hPa (3500m) a ne brzini vetra iznad tla, gde se nalaze zemaljske sonde za merenje brzine i pravca vetra. Takođe je napomenuto da postoje najverovatniji pravci kretanja kišnih događaja, odnosno da raspodela azimuta brzine vetra za vreme kiše, nije uniformna.

U okviru Bolton eksperimenta [Upton 02] primenjen je metod za analizu praćenja kretanja kišnih događaja na osnovu rezultata merenja na mreži kišnih sonde primenom korelaciono-regresionog metoda, bez prethodne detekcije pozicije kišnih ćelija. Dobijeni rezultati sugerišu da se kiša kreće brzinama od 10 do 70km/h, sa srednjom vrednosti od 34.6km/h (Sl.2.15). Vrednosti izvan ovog opsega se retko pojavljuju. Takođe je pokazano da postoji opseg azimuta brzine vektora u kojima je verovatnoća kretanja preko 5 puta manja nego u ostalim pravcima. U konkretnom slučaju to je opseg azimuta od 190° do 300° (Sl.2.15) .

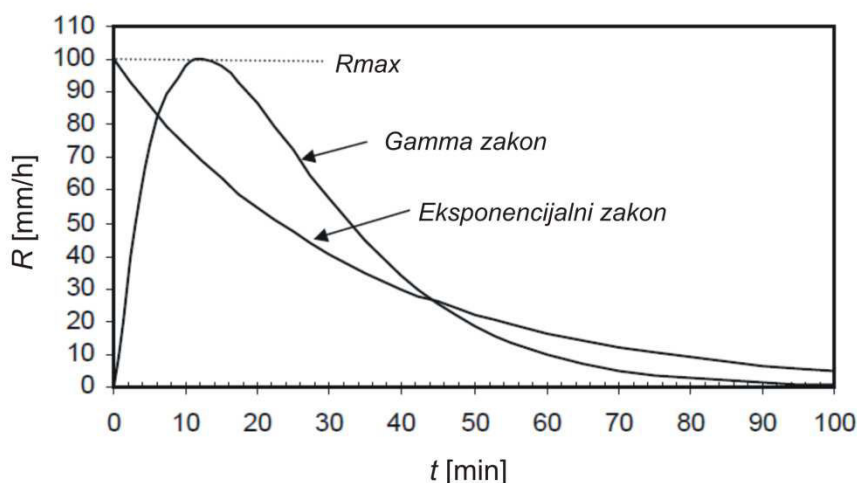


Sl. 2.15. Raspodele vektora brzine kretanja kišnih masa mereno pri ukupno 107 kišnih događaja u Bolton eksperimentu

U [Binaghi 92] za područje Milana, Italija dobijen je rezultat da se najverovatnije brzine kretanja kiše nalaze u opsegu od 10 do 40km/h, i takođe postoje favorizovani pravci kretanja kiše. U konkretnom slučaju opseg azimuta sa više od pet puta manjim verovatnoćama pojavljivanja u odnosu na ostale azimute je veći nego u Bolton eksperimentu i kreće se od 100° do 280°. U [Akuon 11] uočena je zavisnost brzine kretanja kišnih ćelija u funkciji maksimalnog intenziteta kiše R_{max} . Pokazano je da se ćelije većeg intenziteta kiše kreću većom brzinom nego ćelije manjeg intenziteta kiše i sugerisano je da se za stratiform kišne ćelije (intenziteta manjeg od 20mm/h) usvoji brzina od 6m/s, a za veće intenzitete kiše (preko 20mm/h) brzina kretanja od 10m/s.

2. PREGLED LITERATURE

Pored samog kretanja kišnih ćelija nošenih vetrom, u okviru dinamike kišnih događaja, potrebno je modelovati proces nastanka, modifikacije i nestajanja kišne ćelije. Jedan od modela ovog procesa prikazan je u [Rodriguez-Iturbe 87] koji podrazumeva Gausovski prostorni model kišne ćelije, sa dodatkom da maksimalni intenzitet kiše moduliše eksponencijalna ili gama komponenta tako da se uspostavljanje maksimalnog intenziteta kiše u centru kišne ćelije dešava značajno brže nego njegovo smanjivanje. Pored intenziteta u centru kišne ćelije, proporcionalno se moduliše i prečnik kišne ćelije. Ovaj proces nazvan je proces "rađanja i raspadanja" (engl. *birth and decay*) kišne ćelije. Vreme trajanja ovakvih kišnih ćelija iznosi nekoliko desetina minuta (Sl. 2.16). Primena datog modela za kišu velikog intenziteta u centru kišne ćelije i način izbora parametara modela za Mediteransku oblast prikazani su u [Salson 03].



Sl. 2.16. Proces rađanja i raspadanja kišne ćelije velikog intenziteta

Imajući brzinu kretanja kišne ćelije reda veličine od oko 10m/s, u ovoj disertaciji je usvojena aproksimacija da je oblik kišne ćelije približno konstantan za vreme prelaska kišne ćelije preko površine na kojoj je instalirana MRR70GHz. Da bi ovakav model bio u saglasnosti sa tokom nastanka i prestanka kiše posmatranom u jednoj tački (na primer na jednoj VRG), opisanim u [Northrop 05] mora se pretpostaviti minimalna brzina kretanja kišne ćelije v_{min} .

3. OPIS PREDLOŽENOG METODA ZA ANALIZU PERFORMANSI RR70GHz i MRR70GHz NA BAZI KPI

Pri analizi performansi na nivou jedne RR70GHz potrebno je kvantitativno okarakterisati pojavu da za vreme kišnog događaja privremeno dolazi do smanjenje kapaciteta veze. Novi predloženi metod polazi od osećaja korisnika radio-relejne veze, te analizira dinamiku promene kapaciteta radio-relejne veze uzrokovanu pomerajućom kišnom ćelijom i ukupni efekat menjanja na količinu podataka koju korisnik može preneti radio-relejnou vezou za vreme kišnog događaja.

Da bi se dati pristup generalizovao na nivo cele mreže MRR70GHz pored analize uticaja dinamike kišnog događaja analizira se i ponašanje ostalih korisnika u MRR70GHz, kao i konačna brzina reakcije algoritama preusmeravanja saobraćaja. Zbog toga se posmatraju dva karakteristična slučaja: a. neopterećena mreža kad su u jednom trenutku svi resursi mreže dostupni jednom korisniku i b. opterećena mreža kad u jednom trenutku svako čvorište komunicira sa svakim i svi saobraćajni zahtevi proporcionalno fer dele kapacitete svih radio-relejnih veza u mreži. Da bi se simulirao uticaj kiše na različite servise u generalizovanom slučaju na nivou cele mreže se ne posmatra ukupna količina prenesenih podataka, već prosečan kapacitet dodeljen za realizaciju veze između svakog para čvorišta. Izborom vremena usrednjavanja kapaciteta simuliraju se različiti servisi, te kratka vremena od 1s do 10s odgovaraju visoko interaktivnim servisima, a dugačka vremena reda veličine 60s odgovaraju prenosu datoteka.

3.1. *Analiza performansi na nivou jedne RR70GHz*

Analiza performansi će biti izvršena na primeru dve radio-relejne veze čije su dužine 3km i 6km. Tipični parametri RR70GHz veze dati su u tabeli 3.1. Radio-relejni uređaj sa većom antenom dobitka 50dBi, se koristi na deonici dužine 6km, dok se radio-relejni uređaj sa manjom antenom, dobitka 46dBi, koristi na deonici dužine 3km. Uređaji imaju ugrađen

3. OPIS PREDLOŽENOG METODA ZA ANALIZU PERFORMANSI RR70GHz I MRR70GHz NA BAZI KPI

sistem za realizaciju kompromisa između snage prijemnog signala i kapaciteta veze, koji je realizovan primenom adaptivnog protoka, modulacije i/ili zaštitnog kodovanja. Adaptacija je skokovita u koracima 1Gbit/s, 100Mbit/s i 10Mbit/s.

Tabela 3.1. Parametri radio relejnih veza

Parametar veze	veza A	veza B
Dužina deonice	3 km	6 km
Centralna frekvencija f	80 GHz	
Polarizacija	vertikalna	
Intenzitet kiše prevaziđen u 0.01% vremena $R_{0.01}$	30 mm/h	
Izlazna snaga p_{Tx}	17 dBm	
Prag prijema n_{RT1} za protok 1Gbit/s	-65 dBm	
Prag prijema n_{RT2} za protok 100Mbit/s	-75 dBm	
Prag prijema n_{RT3} za protok 10Mbit/s	-85 dBm	
Dobici antena na obe lokacije g_A+g_B	88 dBi	100dBi

Tabela 3.2. Proračun kvaliteta veza prema ITU-R P530-14

Parametar veze	veza A	veza B
Rezerva za feding za protok 1Gbit/s	32.5 dB	33.0 dB
Rezerva za feding za protok 100Mbit/s	42.5 dB	43.0 dB
Rezerva za feding za protok 10Mbit/s	52.5 dB	53.0 dB
Efektivna dužina deonice	2.46 km	3.73 km
Slabljenje prevaziđeno u 0.01% vremena	31.3 dB	47.4 dB
Procenat vremena sa punim kapacitetom 1Gbit/s	99.9911%	99.9738%
Procenat vremena sa redukovanim kapacitetom 100 Mbit/s	0.0053%	0.0130%
Procenat vremena sa redukovanim kapacitetom 10 Mbit/s	0.0022%	0.0061%
Procenat vremena u kome je veza neraspoloživa	0.0014%	0.0071%
Ukupno godišnje vreme rada s redukovanim kapacitetom	2385s	6049s
Ukupan broj događaja redukcije kapaciteta	17	44
Ukupno godišnje vreme neraspoloživosti	429s	2231s
Ukupan broj događaja redukcije kapaciteta	4	14

3. OPIS PREDLOŽENOG METODA ZA ANALIZU PERFORMANSI RR70GHz I MRR70GHz NA BAZI KPI

Analiza performansi ovih veza urađena je za klimatsku zonu u kojoj intenzitet kiše prevaziđen u 0.01% vremena iznosi 30mm/h, a za proračun je korišćen model prostiranja ITU-R P.530-14 [ITU-R Rec.P.530-14], čije su osnovne postavke opisane u poglavlju 2.

Rezultati proračuna procenta rada veze sa kapacitetom redukovanim na određenu vrednost (Tabela 3.2.), ne pružaju dovoljan uvid u performanse koje može korisnik očekivati. Tradicionalna primena digitalnih sistema prenosa je prenos datoteka.

Za ovu primenu predložen je novi indikator performansi koji predstavlja količinu prenešenih podataka za vreme kišnog događaja simuliranog pomerajućom kišnom ćelijom (engl. *file transfer under rain cell influence- FT_{RC}*). Ovaj parametar praktično simulira ponašanje veze pri prenosu datoteka (engl. File Transfer Protocol - FTP) opisanom u RFC 959 [RFC 959]. Indikator FT_{RC} je definisan kao:

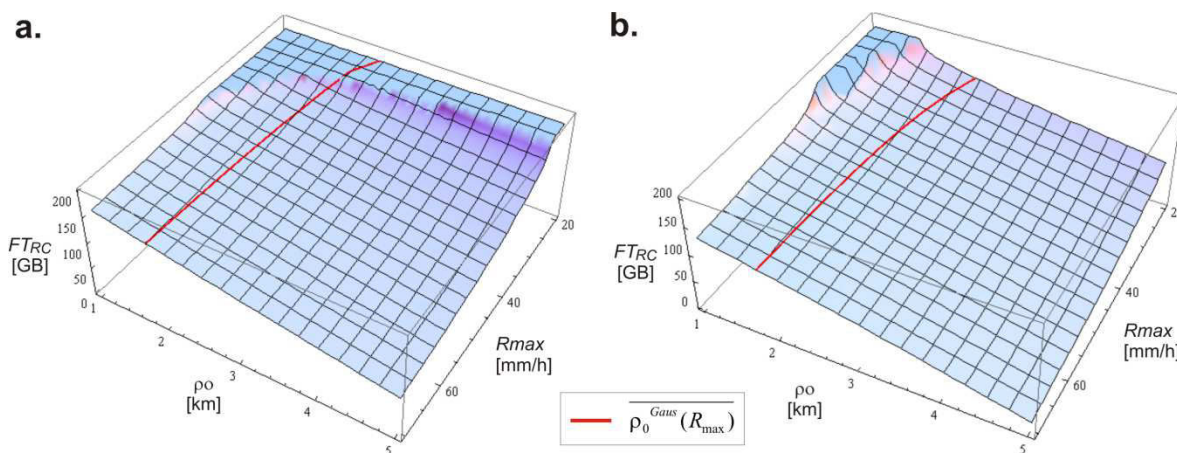
$$FT_{RC} = \int_0^{T_{RC}} c_{RCtest}(t) dt, \quad (3.1.)$$

gde je sa $c_{RCtest}(t)$ označen trenutni kapacitet veze pod uticajem pomerajuće test kišne ćelije. Test kišna ćelija ima Gausovsku raspodelu intenziteta, opisanu izrazom (2.15), pri čemu je faktor oblika $ko=1$. Uzima se u obzir najgori slučaj kada se putanja kretanja kišne ćelije poklapa sa pravcem prostiranja radio-relejne veze, a trajanje integraljenja T_{RC} , obuhvata kompletno vreme u kome postoji degradacija kapaciteta veze. Za brzinu kretanja kišne ćelije se uzima najverovatnija brzina, koja u konkretnom primeru iznosi 10m/s. Kao što je navedeno u poglavlju 2, parametri kišne ćelije R_{max} i ρ_0 mogu imati proizvoljne vrednosti, te se vrednost FT_{RC} računa za ceo prostor R_{max} i ρ_0 parametara od interesa i posmatra oblik zavisnosti ovog dvodimenzionog dijagrama (Sl.3.1). Budući da postoji trend da većim R_{max} odgovara manje ρ_0 na dijagramima se njihova uslovna verovatnoća može modelovati log-normalnom raspodelom, izraz (2.18) i (2.19). Ova kriva se takođe prikazuje na dijagramima, kako bi se razdvojio opseg verovatnih, od manje verovatnih slučajeva.

Rezultati analize prikazani na Sl.3.1 pokazuju da u slučaju veze A pri FTP servisu korisnik veze praktično ne oseća degradaciju kvaliteta servisa uzrokovanu propagacijom. Posebno je značajno da za ovaj tip servisa nerazpoloživost veze A ne utiče, jer su periodi prekida servisa usled prevelikog kašnjenja odziva (engl. *timeout*) [RFC 959] dovoljno dugi da ne dolazi do prekida saobraćaja. Sa druge strane, proračun P530-14 (Tabela 3.2) je za vezu B predvideo 2.5 puta lošije performanse u pogledu trajanja redukcije kapaciteta u odnosu na vezu A, i oko pet puta lošije performanse u pogledu trajanja nerazpoloživosti veze, a analiza

3. OPIS PREDLOŽENOG METODA ZA ANALIZU PERFORMANSI RR70GHz I MRR70GHz NA BAZI KPI

FT_{RC} indikatora pokazuje da će korisnik veze u preko 80% kišnih događaja osetiti preko 50% lošije performanse FTP servisa.



Sl. 3.1. Performanse prenosa datoteka u prisustvu kišnog događaja a. za vezu A i b. za vezu B.

Iako analiza FT_{RC} indikatora pretpostavlja najgori slučaj kad se putanja kišne ćelije poklapa sa radio-relejnim pravcem, analiza ostaje u važnosti, jer se realni slučajevi prolaska kišne ćelije pod nekim uglom mogu približno posmatrati kao kretanje kišne ćelije manjeg intenziteta u centru ćelije, a većeg karakterističnog rastojanja duž ose radio-relejne veze. Nedostatak analize je pretpostavljanje konstantne brzine kretanja, te je za precizniji rezultat očekivanja performansi na godišnjem nivou potrebno koristiti skup kišnih ćelija koje simuliraju godišnju raspodelu intenziteta kiše što će biti opisano u četvrtom poglavlju.

3.2. Generalizacija analize performansi na nivo mreže MRR70GHz

Kada se RR70GHz koriste za povezivanje usmerivača u računarskim mrežama formira se MRR70GHz. Performanse mreže koje osećaju korisnici MRR70GHz pored efekata na fizičkom nivou osećaju i uticaj drugih korisnika. Pošto se generisani saobraćaj od strane drugih korisnika menja, predloženi KPI koji karakterišu MRR70GHz posmatraju količinu podataka prenesenih u vremenskom intervalu trajanja kraćem od ukupnog trajanja kišnog događaja.

Trajanje vremena integracije količine prenesenih podataka zavisi od primene koja se simulira. Kratka vremena trajanja reda veličine 1s odgovaraju aplikacijama sa visokom interaktivnošću kao što su VoIP ili video konferencije [ITU H.323]. Nešto duža vremena

3. OPIS PREDLOŽENOG METODA ZA ANALIZU PERFORMANSI RR70GHz I MRR70GHz NA BAZI KPI

integracije reda veličine 10s odgovaraju aplikacijama kao što su video i audio striming u kojima se kratkotrajne varijacije kapaciteta mogu kompenzovati uvođenjem odgovarajućih bafera [Metzger 12]. Dugačka vremena integracije, reda veličine 60s ili duža, odgovaraju prenosu podataka [RFC 959], slično kao FT_{RC} .

Predloženi KPI imaju dimenziju kapaciteta veze, te su označeni kao kapacitet veze pod pretpostavljenom ponašanju drugih korisnika. U uslovima slabog opterećenja mreže, korisnik u jednom trenutku vremena praktično koristi sve resurse mreže [Pioro 04]. Za simulaciju ovakvog slučaja definisan je ključni indikator performansi kapacitet dodeljen samo jednom korisniku (engl. *capacity only user* - C-OU). Glavna namena ovog parametra je identifikovanje saobraćajnih zahteva u mreži, koji dominantno zbog uticaja na fizičkom sloju imaju lošije performanse u odnosu na druge saobraćajne zahteve.

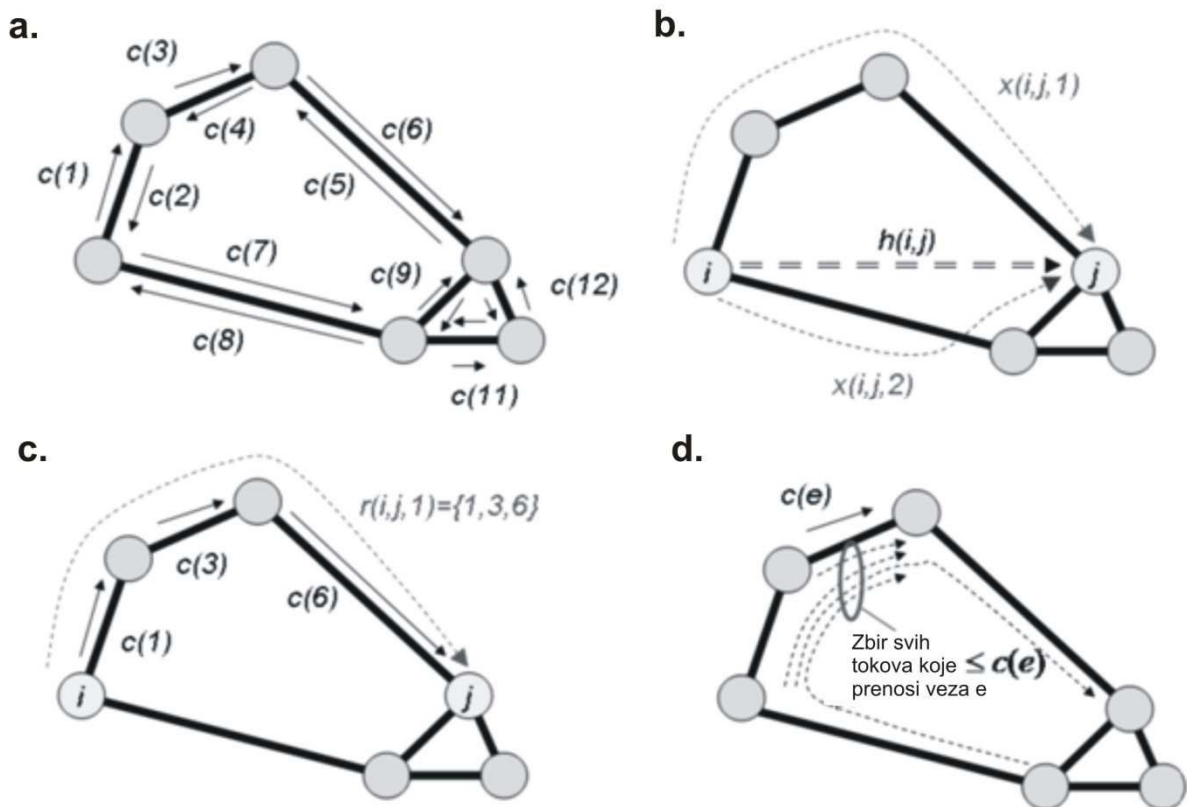
Drugi karakterističan slučaj odgovara ponašanju mreže kada saobraćajni zahtevi praktično uzrokuju zagušenje u pojedinim segmentima mreže. Uz pretpostavku proporcionalno fer raspodele kapaciteta veza u mreži gde se izbegava velika varijacija dodeljenih kapaciteta između pojedinih saobraćajnih zahteva [Pioro 04] određuju se dodeljeni kapaciteti. Na taj način definisan je ključni indikator performansi kapaciteta dodeljenog korisniku pri fer raspodeli kapaciteta veza (engl. *capacity under fair capacity distribution* C-FCD) [Peric-Telfor-2012]. Namena ovog parametra je procena koliko se performanse kapaciteta koje korisnik opterećene mreže oseća degradiraju u prisustvu kiše zbog efekta da se veze koje nisu pogođene kišom, dodatno opterećuju novim saobraćajnim zahtevima koji su zbog mehanizama zaštite saobraćaja privremeno preusmereni preko njih.

KPI C-OU i C-FCD se posmatraju u formi kumulativne funkcije raspodele na nivou svih saobraćajnih zahteva u mreži, pri čemu se za simulaciju uticaja kiše koristi skup pomerajućih kišnih ćelija koje simuliraju godišnju raspodelu intenziteta kiše na geografskom prostoru na kome je instalirana MRR70GHz. Dodatno KPI C-OU se može posmatrati i na nivou pojedinačnih saobraćajnih zahteva i na taj način se može utvrditi postojanje uskih grla u mreži, koje se mogu otkloniti preprojektovanjem topologije mreže ili metoda usmeravanja saobraćaja.

3. OPIS PREDLOŽENOG METODA ZA ANALIZU PERFORMANSI RR70GHz I MRR70GHz NA BAZI KPI

3.2.1. Matematički model mreže

Primenjen je model računarske mreže prikazan u [Pioro 04] koji je ilustrovan na Sl 3.2. Mreža se sastoji od N_C geografski udaljenih čvorova u kojima su postavljeni usmerivači paketa. Usmerivači su povezani sa E radio-relejnih veza na frekvencijskom opsegu iznad 70GHz. Svaka RR70GHz je projektovana tako da u odsustvu kiše ima maksimalni kapacitet koji iznosi $C_o(e)$, $e=1,...,E$. Pod uticajem kiše dolazi do varijacije kapaciteta veza te je trenutni kapacitet veza u trenutku t označen kao $c(e,t)$, $e=1,...,E$.



Sl. 3.2 Ilustracija modela računarske mreže: a. struktura mreže i kapaciteti veza, b. saobraćajni zahtevi i tokovi za njihovu realizaciju, c. putanje, d. ograničenje kapaciteta

Saobraćajni zahtev opisan je matricom saobraćajnih zahteva $\mathbf{H}$, čiji element h_{ij} , gde $i=1,...,N_C$, $j=1,...,N_C$ predstavlja saobraćajni zahtev od čvora i ka čvoru j . U ovoj analizi lokalni saobraćaj se ne uzima u razmatranje, te je $h_{ij}=0$, ako je $i=j$. Svaki od saobraćajnih zahteva može biti realizovan korišćenjem većeg broja tokova. Broj tokova može biti različit za sve saobraćajne zahteve i iznosi $N_T(i,j) \geq 1$, te su tokovi za realizaciju

3. OPIS PREDLOŽENOG METODA ZA ANALIZU PERFORMANSI RR70GHz I MRR70GHz NA BAZI KPI

saobraćajnog zahteva označeni kao $x(i,j,k)$, $i=1,...,N_C$, $j=1,...,N_C$, $k=1,...,N_T(i,j)$. Saobraćajni zahtev je jednak zbiru tokova koji ga osplužuju:

$$h(i,j) = \sum_{k=1}^{N_T(i,j)} x(i,j,k), \quad i=1,...,N_C, j=1,...,N_C, i \neq j. \quad (3.2)$$

Protokol usmeravanja saobraćaja svakom saobraćajnom zahtevu $x(i,j,k)$ dodeljuje putanju kroz mrežu $r(i,j,k)$, $i=1,...,N_C$, $j=1,...,N_C$, $k=1,...,N_T(i,j)$ koja se sastoji od liste indeksa veza koji je čine. Tabela usmeravanja $\mathbf{R}$ je skup svih putanja kroz mrežu. Na osnovu $\mathbf{R}$ za svaku putanju se formira lista indikatora pripadnosti veza putanji $\mathbf{D}(i,j,k)$:

$$\begin{aligned} \mathbf{D}(i,j,k) &= \{\delta(i,j,k,1),..., \delta(i,j,k,e),..., \delta(i,j,k,E)\}, \\ \delta(i,j,k,e) &= \begin{cases} 1, \text{ veza } e \text{ pripada putanji } r(i,j,k) \\ 0, \text{ ne pripada} \end{cases}, \\ i &= 1,...,N_C, j=1,...,N_C, i \neq j, k=1,...,N_T(i,j). \end{aligned} \quad (3.3)$$

Koristeći ovu notaciju definiše se ograničenje da suma svih tokova koje opslužuje jedna veza ne može prevazići njen kapacitet:

$$\sum_{i=1}^{N_C} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_C} \sum_{k=1}^{N_T(i,j)} \delta(i,j,k,e) \cdot x(i,j,k) \leq c(e), \quad e=1,...,E. \quad (3.4)$$

U zavisnosti od promena stanja u mreži, tabela usmeravanja $\mathbf{R}$ se menja. Vreme od promene u mreži do korekcije tabele usmeravanja naziva se vreme reakcije mreže i označeno je sa T_R . Na primer u standardnom OSPF protokolu usmeravanja [RFC 2328], stanje veze se detektuje periodičnom razmenom test paketa (tzv. Hello paketi) na svakih 10s. U slučaju izostanka ili neispravnog prijema četiri uzastopna Hello paketa proglašava se da je veza u prekidu i o tome usmeravač koji prima Hello pakete obaveštava sve ostale usmerivače u mreži slanjem paketa oglašavanja stanja veza (engl. *link state advertisement* - LSA). Usmerivači koji dobiju ove pakete preračunavaju svoje tabele usmeravanja. Na taj način vreme reakcije za standardni OSPF protokol usmeravanja iznosi 40s uvećano za vreme slanja LSA paketa i ponovni proračun tabele usmeravanja. Imajući u vidu veliku brzinu prenosa po vezama u MRR70GHz i veliku procesnu moć usmerivača, može se pretpostaviti da je vreme slanja LSA paketa i preračunavanja tabele usmeravanja blisko nuli, te je $T_R(\text{OSPF})=40\text{s}$.

U periodu od promene na fizičkom nivou do upotrebe nove tabele usmeravanja, mreža šalje pakete po staroj tabeli usmeravanja, te dolazi do gubitaka paketa i petlji u usmeravanju. Ovaj period se naziva periodom konvergencije mreže. Može se simulirati na dva načina:

3. OPIS PREDLOŽENOG METODA ZA ANALIZU PERFORMANSI RR70GHz I MRR70GHz NA BAZI KPI

- a) Za vreme perioda konvergencije mreže, mreža isporučuje pakete samo za veze za koje su putanje korektne i svi kapaciteti veza se koriste za realizaciju ovih zahteva
- b) Za vreme perioda konvergencije mreže, mreža uopšte ne isporučuje pakete.

U realnim uslovima mreža se ponaša između dva granična slučaja a) i b). Za simulaciju ovih situacija neophodno je koristiti složene modele na nivou paketa koji uzimaju u obzir konkretne implementacije protokola usmeravanja i detaljno pretpostavljanje vrste i osobina saobraćaja koji generišu korisnici. Za ovu vrstu simulacije mogu se koristiti specijalizovani softverski paketi kao što su OPNET [Opnet] i NS2 [Ns2]. Budući da takva analiza ima opseg važnosti za vrlo specifične slučajeve, u ovoj tezi nije razmatrana, već je fokus na analizi graničnih slučajeva koji imaju opštiji značaj.

Da bi se resursi mreže što bolje i ravnomernije iskoristili primenjuje se tehnika raspodeljivanja saobraćaja između tokova za realizaciju saobraćajnih zahteva [Pioro 04]. Na osnovu izraza (3.2) definišu se koeficijenti raspoređivanja saobraćaja $b(i,j,k)$, $i=1,...,N_C$, $j=1,...,N_C$, $k=1,...,N_T(i,j)$, koji opisuju koji deo saobraćaja od generisanog saobraćajnog zahteva $h(i,j)$ raspoređen na tok $x(i,j,k)$ odnosno:

$$b(i,j,k) = \frac{x(i,j,k)}{h(i,j)}, \quad k=1,...,N_T(i,j), i=1,...,N_C, j=1,...,N_C, i \neq j. \quad (3.5)$$

Koeficijenti raspoređivanja saobraćaja se definišu na izvorišnom čvoru saobraćaja, u zavisnosti od informacija o trenutnom stanju u mreži. Jedan od najjednostavnijih načina raspoređivanja je ravnomerno raspoređivanje gde su svi koeficijenti raspoređivanja za jedan saobraćajni zahtev međusobno jednaki i iznose $b(i,j,k)=1/N_T(i,j)$.

U slučaju da pri realizaciji saobraćajnog zahteva putanje dodeljene toku za njegovu realizaciju sadrže zajedničke veze, raspoređivanje saobraćaja se može obaviti na usmerivaču gde dolazi do grananja putanja [Retana 99]. U praktičnim implementacijama gde jedan usmerivač samo usmerava pakete interfejsima za vezu ka sledećem usmerivaču za realizaciju date putanje, ovakav način raspoređivanja saobraćaja je najjednostavniji za realizaciju. Ovakav način raspodeljivanja saobraćaja se takođe može opisati ekvivalentnim koeficijentima raspoređivanja na izvorišnom usmerivaču datim u izrazu (3.5), te prikazani matematički model nema ograničenja u ovom pogledu.

Koeficijenti raspoređivanja saobraćaja se koriguju u skladu sa trenutnim stanjem saobraćajnih zahteva u mreži na osnovu različitih parametara kao što su: zagušenje pojedinih veza, fer raspodela resursa mreže i sl. Odluku o korekciji koeficijenata za dati saobraćajni

3. OPIS PREDLOŽENOG METODA ZA ANALIZU PERFORMANSI RR70GHz I MRR70GHz NA BAZI KPI

zahtev usmeravanja donosi samo jedan uređaj u mreži: usmerivač koji vrši raspoređivanje saobraćaja za dati saobraćajni zahtev, te se korekcija koeficijenata raspoređivanja obavlja za mnogo kraće vreme nego što je slučaj sa preusmeravanjem paketa. Pogrešna odluka o koeficijentima usmeravanja, nema drastične posledice kao što je slučaj pogrešnih putanja u matrici D , već se samo resursi mreže neće moći optimalno koristiti. Za donošenje odluke o korekciji koeficijenata usmeravanja, usmerivač opciono može zahtevati određene informacije o stanju resursa u mreži koje se distribiraju odgovarajućim "službenim" paketima, slično kao LSA mehanizam.

Pošto se koeficijenti raspoređivanja za jedan saobraćajni zahtev menjaju samo na jednom uređaju: usmerivaču koji vrši raspoređivanje saobraćaja za dati saobraćajni zahtev, njihova korekcija je vrlo efikasna i obavlja se praktično trenutno po donošenju odluke o njihovoj promeni. U MRR70GHz dominantni razlog za promenu koeficijenata raspoređivanja saobraćaja je promena kapaciteta veza, te je u okviru ovog matematičkog modela predviđeno da se koeficijenti raspoređivanja saobraćaja koriguju posle T_{RR} vremena. Minimalna vrednost T_{RR} jednaka je iznosu vremenskog koraka sa kojim usmerivači koriguju podatke koji tipično iznosi 1s.

Opisani model praktično je implementiran u okruženju Wolfram Research Mathematica [Wolfram 03]. Neki detalji u vezi implementacije modela opisani su u [Peric ETRAN 05] [Peric SPECTS 07] [Peric ETRAN 07] [Peric ETRAN 10].

3.2.2. *Proračun novih KPI*

Novi KPI C-OU predstavlja maksimalnu količinu podataka koja se može preneti u jednom saobraćajnom zahtevu između usmerivača i i j u toku vremena integracije T_0 , pri čemu su saobraćajni zahtevi ostalih korisnika jednaki nuli. Za konkretno odabrane usmerivače i i j u jednom trenutku C-OU jednak je maksimalnoj mogućoj sumi svih tokova koji opslužuju saobraćajni zahtev $h(i,j)$:

3. OPIS PREDLOŽENOG METODA ZA ANALIZU PERFORMANSI RR70GHz I MRR70GHz NA BAZI KPI

$$\begin{aligned}
 C^{OU,T_0}(i,j) &= \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} h^{OU}(i,j,t) \cdot dt, \\
 h^{OU}(i,j,t) &= \begin{cases} h_{\max}(m,n,t), m=i, n=j \\ 0, \text{ostalo} \end{cases}, \\
 h_{\max}(m,n,t) &= \max_{x_{\max}(m,n,k)} \sum_{k=1}^{N^T(m,n)} x_{\max}(m,n,k,t), \\
 \sum_{i=1}^{N_C} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_C} \sum_{k=1}^{N^T(i,j)} \delta(i,j,k,e,t) \cdot x_{\max}(i,j,k,t) &\leq c(e,t), \quad e=1,\dots,E, \\
 i &= 1,\dots,N_C, j=1,\dots,N_C, i \neq j.
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

pri čemu su ograničenja za maksimizaciju vrednosti tokova $x_{\max}(i,j,k,t)$, $k=1,\dots,N^T(i,j)$: trenutni kapaciteti veza $c(e,t)$, $e=1,\dots,E$, način usmeravanja saobraćaja u datom trenutku opisan trenutnom listom indikatora pripadnosti veza putanji $\mathbf{D}(i,j,k,t)$, način raspoređivanja saobraćaja u datom trenutku opisan trenutnim vrednostima koeficijenata raspoređivanja $b(i,j,k,t)$, kao i uslov opterećenja veza dat izrazom (3.4).

Za procenu performansi MRR70GHz potrebno je odrediti kumulativnu funkciju raspodele vrednosti KPI odnosno za fiksiranu verovatnoću p iz opsega verovatnoća od interesa (od P_{imin} do P_{imax}), i dati saobraćajni zahtev koji polazi iz čvora i prema čvoru j treba odrediti vrednost $C_{i,j}^{OU,T_0,p}$ takvu da:

$$P(C^{OU,T_0}(i,j) < C_{i,j}^{OU,T_0,p}) = p, i=1,\dots,N_C, j=1,\dots,N_C, i \neq j. \tag{3.7}$$

Za određivanje vrednosti verovatnoća $C_{i,j}^{OU,T_0,p}$, ceo posmatrani period (na primer, godinu dana) se izdela na intervale trajanja T_0 , u okviru njih se za svaki saobraćajni zahtev odredi vrednost $C^{OU,T_0}(i,j)$ i na osnovu rezultata računa CDF prema izrazu (3.7). Kao karakteristika cele mreže za fiksiranu vrednost verovatnoće p se posmatrajući vrednosti za sve saobraćajne vrednosti određuju minimalna $C_{Min}^{OU,T_0,p}$, medijalna $C_{Median}^{OU,T_0,p}$ i maksimalna $C_{Max}^{OU,T_0,p}$ vrednost definisane kao:

$$\begin{aligned}
 C_{Min}^{OU,T_0,p} &= \min_{\substack{i=1,\dots,N_C \\ j=1,\dots,N_C, j \neq i}} C_{i,j}^{OU,T_0,p}, \\
 C_{Median}^{OU,T_0,p} &= \text{median}_{\substack{i=1,\dots,N_C \\ j=1,\dots,N_C, j \neq i}} C_{i,j}^{OU,T_0,p}, \\
 C_{Max}^{OU,T_0,p} &= \max_{\substack{i=1,\dots,N_C \\ j=1,\dots,N_C, j \neq i}} C_{i,j}^{OU,T_0,p}.
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

3. OPIS PREDLOŽENOG METODA ZA ANALIZU PERFORMANSI RR70GHz I MRR70GHz NA BAZI KPI

Drugi novi KPI, označen kao C-FCD je funkcija predpostavljenog saobraćaja u mreži koji zadovoljava kriterijum proporcionalno fer raspodeljenih kapaciteta u mreži. Funkcija kvaliteta proporcionalne fer raspodele definisana je kao [Pioro 04]:

$$F = \sum_{i=1}^{N_C} \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{N_C} \text{Log}(h(i, j)) = \sum_{i=1}^{N_C} \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{N_C} \text{Log}\left(\sum_{k=1}^{N^T(i, j)} x(i, j, k)\right). \quad (3.9)$$

Zbog logaritmovanja saobraćajnih zahteva, maksimizacija funkcije F variranjem tokova $x(i, j, k)$ sprečava dodelu nultih kapaciteta za realizaciju pojedinih saobraćajnih zahteva. U jednoj mreži se postupak maksimizacije na obavlja u jednom trenutku, već primenom raspodeljivanja resursa u vremenu (engl. *scheduling*), se teži maksimizaciji funkcije F . Za potrebe matematičkog modela i određivanje KPI C-FCD, ovaj mehanizam se može modelovati numeričkom nelinearnom maksimizacijom funkcije F variranjem saobraćajnih tokova $x(i, j, k)$, uz poštovanje ograničenja kapaciteta veza datog izrazom (3.4). Na osnovu dobijenih vrednosti, koje su funkcija vremena i označene su kao $x_{FCD}(i, j, k, t)$ određuje se vrednost KPI C-FCD za svaki saobraćajni zahtev, integraljenjem dodeljenih kapaciteta u vremenu integracije T_0 :

$$C^{FCD, To}(i, j) = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} h_{FCD}(i, j, t) \cdot dt, i = 1, \dots, N_C, j = 1, \dots, N_C, i \neq j, \quad (3.10)$$

pri čemu $h_{FCD}(i, j, t)$ predstavljaju elemente matrice saobraćajnih zahteva sa proporcionalno fer raspodeljenim kapacitetima veza između svih saobraćajnih zahteva u trenutku t , $\mathbf{H}_{FCD}(t)$, i računaju na osnovu problema optimizacije sa ograničenjima:

$$\begin{aligned} F_{\max} &= \max_{x(i, j, k, t)} \sum_{i=1}^{N_C} \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{N_C} \text{Log}\left(\sum_{k=1}^{N^T(i, j)} x_{FCD}(i, j, k, t)\right), \\ \sum_{i=1}^{N_C} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_C} \sum_{k=1}^{N^T(i, j)} \delta(i, j, k, e, t) \cdot x_{FCD}(i, j, k, t) &\leq c(e, t), \quad e = 1, \dots, E, \\ h_{FCD}(i, j, t) &= \sum_{k=1}^{N^T(i, j)} x_{FCD}(i, j, k, t). \end{aligned} \quad (3.11)$$

Slično kao za KPI C-OU, i vrednost KPI C-FCD, se posmatra u formi CDF za svaki saobraćajni zahtev, te je za odabrani par izvorišnog usmerivača i i odredišnog usmerivača j potrebno odrediti kapacitet $C_{i, j}^{FCD, To, p}$ koji neće biti prevaziđen sa verovatnoćom p iz opsega od interesa od P_{imin} do P_{imax} , odnosno:

3. OPIS PREDLOŽENOG METODA ZA ANALIZU PERFORMANSI RR70GHz I MRR70GHz NA BAZI KPI

$$P(C^{FCD,T_0}(i,j) < C_{i,j}^{FCD,T_0,p}) = p, i=1,...,N_C, j=1,...,N_C, i \neq j \quad (3.12)$$

Na osnovu dobijenih vrednosti $C_{i,j}^{FCD,T_0,p}$ računaju se statistike na nivou svih saobraćajnih zahteva u mreži, odnosno minimalna $C_{Min}^{FCD,T_0,p}$, medijalna $C_{Median}^{FCD,T_0,p}$ i maksimalna $C_{Max}^{FCD,T_0,p}$ vrednost definisane kao:

$$\begin{aligned} C_{Min}^{FCD,T_0,p} &= \min_{\substack{i=1,...,N_C \\ j=1,...,N_C, j \neq i}} C_{i,j}^{FCD,T_0,p}, \\ C_{Median}^{FCD,T_0,p} &= \text{median}_{\substack{i=1,...,N_C \\ j=1,...,N_C, j \neq i}} C_{i,j}^{FCD,T_0,p}, \\ C_{Max}^{FCD,T_0,p} &= \max_{\substack{i=1,...,N_C \\ j=1,...,N_C, j \neq i}} C_{i,j}^{FCD,T_0,p}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Za razliku od KPI C-OU, zbog načina definisanja KPI C-FCD gde je potrebno pretpostaviti saobraćajne zahteve, odnosno odrediti matricu $h_{FCD}(i,j,t)$, konkretne vrednosti $C_{i,j}^{FCD,T_0,p}$ nemaju praktičnog značaja za karakterisanje performansi konkretnog saobraćajnog zahteva između čvorova i i j , već se posmatraju samo statistike na nivou cele mreže: $C_{Min}^{FCD,T_0,p}$, $C_{Median}^{FCD,T_0,p}$ i $C_{Max}^{FCD,T_0,p}$. Od posebnog značaja je poređenje vrednosti za specificiranu verovatnoću p iz opsega od interesa od P_{imin} do P_{imax} sa vrednostima koje odgovaraju odsustvu kiše. Ove referentne vrednosti označene su kao: $C_{Min}^{FCD,no-fading}$, $C_{Median}^{FCD,no-fading}$ i $C_{Max}^{FCD,no-fading}$. One formalno odgovaraju verovatnoći $p=1$ (odnosno 100% vremena), i ne zavise od vremena integracije T_0 pošto se kapaciteti veza u odsustvu kiše ne menjaju.

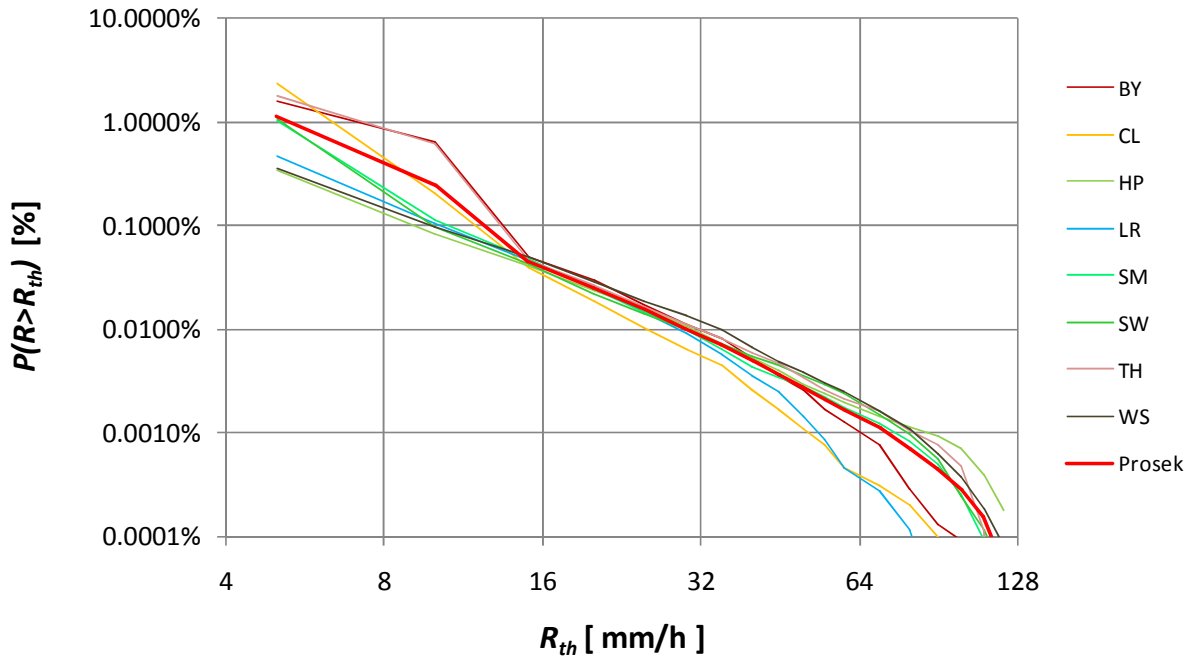
4. NOVI MODEL GODIŠNJE RASPODELE INTENZITETA KIŠE

U ovom poglavlju opisan je novi model godišnje raspodele intenziteta kiše na bazi pomerajućih kišnih ćelija, koji je pogodan za analizu prelaznih pojava u MRR70GHz. Model je u prednosti u odnosu na do sada publikovane modele jer simulira dinamičke promene intenziteta kiše u posmatranom području, vodeći računa da su na skupu test virtualnih kišnih sondi ispunjene sledeće pretpostavljene statističke osobine kiše: CDF intenziteta kiše, broj kišnih događaja, raspodelu intenziteta brzine vetra i raspodelu azimuta vektora brzine vetra. Tolerancije odstupanja simuliranih vrednosti ovih statičkih parametara kiše od pretpostavljenih vrednosti, dobijene su na osnovu analize izmerenih podataka sa kišnih sondi u Bolton eksperimentu [Bolton 06]. Postavka Bolton eksperimenta je opisana u poglavlju 2 (Sl. 2.8).

4.1. Analiza podataka Bolton eksperimenta i usvajanje tolerancija

Kao najznačajniji parametar analizirana je kumulativna funkcija raspodele intenziteta kiše (Sl. 4.1). Razlika CDF-a na pojedinačnim sondama u odnosu na prosečnu vrednost je manja od 20% u opsegu intenziteta kiše koji odgovaraju verovatnoćama od 0.001% do 0.01% vremena. Za vrlo velike intenzitete kiše (preko 60mm/h) rasipanje je veće, što se može tumačiti malim brojem kišnih događaja. Isto tako, za vrlo male intenzitete kiše rasipanje je za sondu TH izraženije u odnosu na ostale, što može biti uzrokovano i njenom lokalnom pozicijom u odnosu na ostale.

4. NOVI MODEL GODIŠNJE RASPODELE INTENZITETA KIŠE



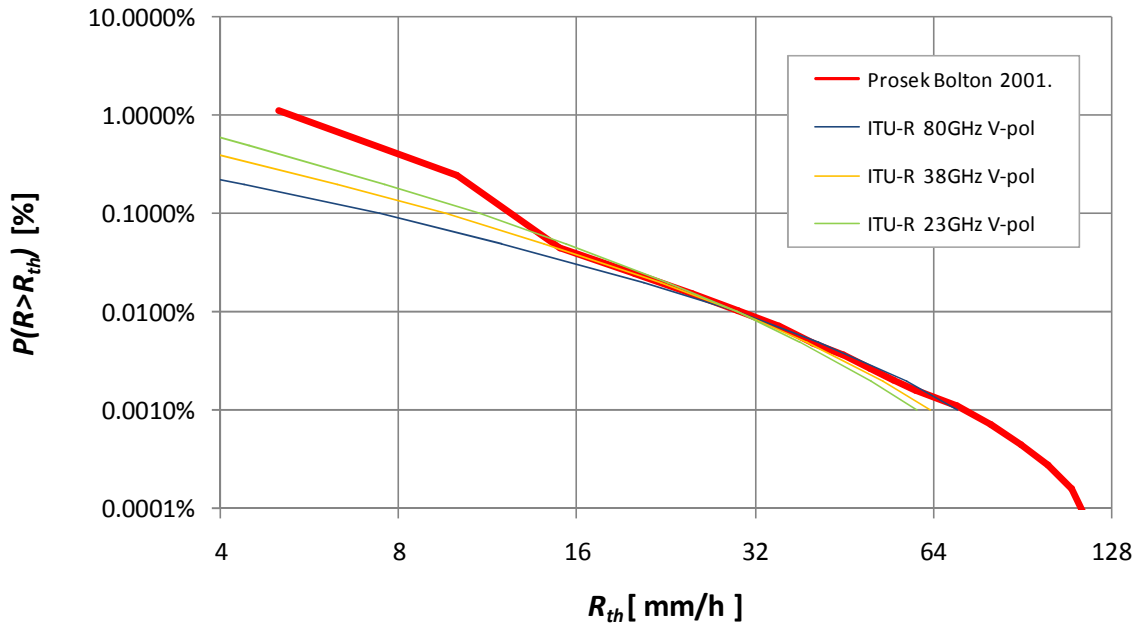
Sl 4.1. Izmerene CDF trenutnog intenziteta kiše na različitim sondama u Bolton eksperimentu za 2001. godinu

U prvoj aproksimaciji logaritam $P(R > R_{th})$ je linearna funkcija R_{th} , a bolje slaganje se može postići polinomijalnom zavisnošću. Izraz (2.13) koji opisuje zavisnost slabljenja usled kiše prevaziđenog u p procenata vremena i slabljenja prevaziđenog u 0.01% vremena se može transformisati u:

$$\frac{A_p}{A_{0.01}} = \frac{\gamma_p \cdot d_{eff}}{\gamma_{0.01} \cdot d_{eff}} = \frac{\gamma_p}{\gamma_{0.01}} = \frac{k \cdot R_p^\alpha}{k \cdot R_{0.01}^\alpha} = \frac{R_p^\alpha}{R_{0.01}^\alpha} = C_1 \cdot p^{-(C_2 + C_3 \log_{10} p)}, p = P(A > A_p), \quad (4.1)$$

gde su C_1 , C_2 i C_3 konstante koje su funkcije frekvencije [ITU-R Rec.P.530-14].

Dobijeni rezultati za pretpostavljene učestanosti 23, 38 i 80GHz i vertikalnu polarizaciju i prosečna vrednost rezultata merenja sa kišnih sonde u Bolton eksperimentu prikazane su na Sl. 4.2. Dobijeni rezultati pokazuju odlično poklapanje izmerenih vrednosti u opsegu koji odgovaraju verovatnoćama od 0.005% do 0.05%. Za vrednosti intenziteta kiše niže od 10mm/h ITU-R preporuka daju do pet puta manju verovatnoću nego što pokazuju rezultati merenja. Imajući u vidu tipične vrednosti rezerve za feding i vrednosti podužnih slabljenja, ova odstupanja rezultata za male intenzitete kiše nemaju značaja za praktičnu primenu.



Sl 4.2. Slaganje prosečne izmerene CDF intenziteta kiše sa ITU-R preporukama

Na osnovu datih rezultata, kao polazna tačka za formiranje modela godišnje raspodele intenziteta kiše usvojena je zavisnost verovatnoće da intenzitet kiše bude manji od datog praga $P^T(R > R_{th})$ data u preporuci P.530 uz pretpostavku centralne frekvencije 80GHz i vertikalne polarizacije:

$$R_{th} = R_{0.01} \cdot 10^{-1.448 - 0.957 \log_{10} p - 0.117 (\log_{10} p)^2}, p = P^T(R > R_{th}), \quad (4.2)$$

gde je $R_{0.01}$ intenzitet kiše prevaziđen u 0.01% vremena.

Ova zavisnost treba da bude zadovoljena za N^{TH} karakterističnih vrednosti pragova intenziteta kiše $R_{th}(k)$, $k=1, \dots, N^{TH}$. Na svakoj od ukupno N^{VRG} virtualnih kišnih soni dobijena vrednost verovatnoće da je intenzitet kiše manji od datog praga $p_{th}(k) = P_i(R > R_{th}(k))$, $i=1, \dots, N_{vrg}$, $k=1, \dots, N_{th}$ treba da ima relativno odstupanje manje od definisane vrednosti Δp odnosno:

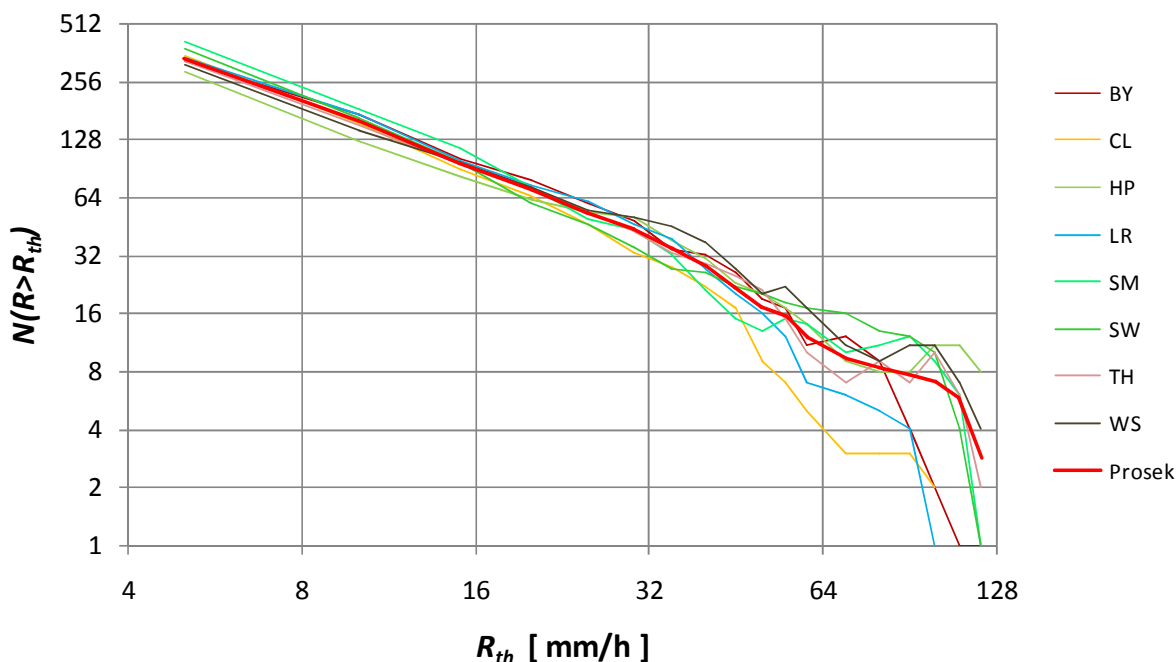
$$\frac{|P_i(R < R_{th}(k)) - p_{th}(k)|}{p_{th}(k)} < \Delta p. \quad (4.3)$$

Za analizu performansi RR70GHz i MRR70GHz potrebno je da opseg verovatnoća p_k , $k=1, \dots, N_{Rth}$ pokriva opseg od interesa od P_{imin} do P_{imax} . Imajući u vidu primenu standarda za performanse prenosnih sistema [ITU-T G.826] [ITU-T G.827] dovoljno je usvojiti $P_{imin}=0.001\%$ i $P_{imax}=0.1\%$ vremena, a u konkretnim slučajevima mogu se usvojiti i druge

4. NOVI MODEL GODIŠNJE RASPODELE INTENZITETA KIŠE

vrednosti. Bez gubitka opštosti usvaja se da je $R_{th,1} > R_{th,2} > \dots > R_{th,NRth}$, odnosno $p_{th,1} < p_{th,2} < \dots < p_{th,NRth}$.

U pogledu broja kišnih događaja (Sl.4.3) vrlo je izražena praktično linearna zavisnost broja kišnih događaja $N(R > R_{th})$ od logaritama vrednosti pragova intenziteta kiše R_{th} . Praćenje datog trenda na pojedinačnim sondama prisutno je do intenziteta kiše od oko 50mm/h, dok usrednjavanje po svim sondama povećava opseg do 70mm/h, što odgovara verovatnoćama pojavljivanja ispod 0.001% vremena. Razlog za to je što je broj pojavljivanja tako visokih intenziteta kiše mali, te statističke zavisnosti ne dolaze do izražaja.



Sl. 4.3. Broj kišnih događaja na različitim sondama u kojima je prevaziđena vrednost praga intenziteta kiše zabeleženih u Bolton eksperimentu 2001. godine

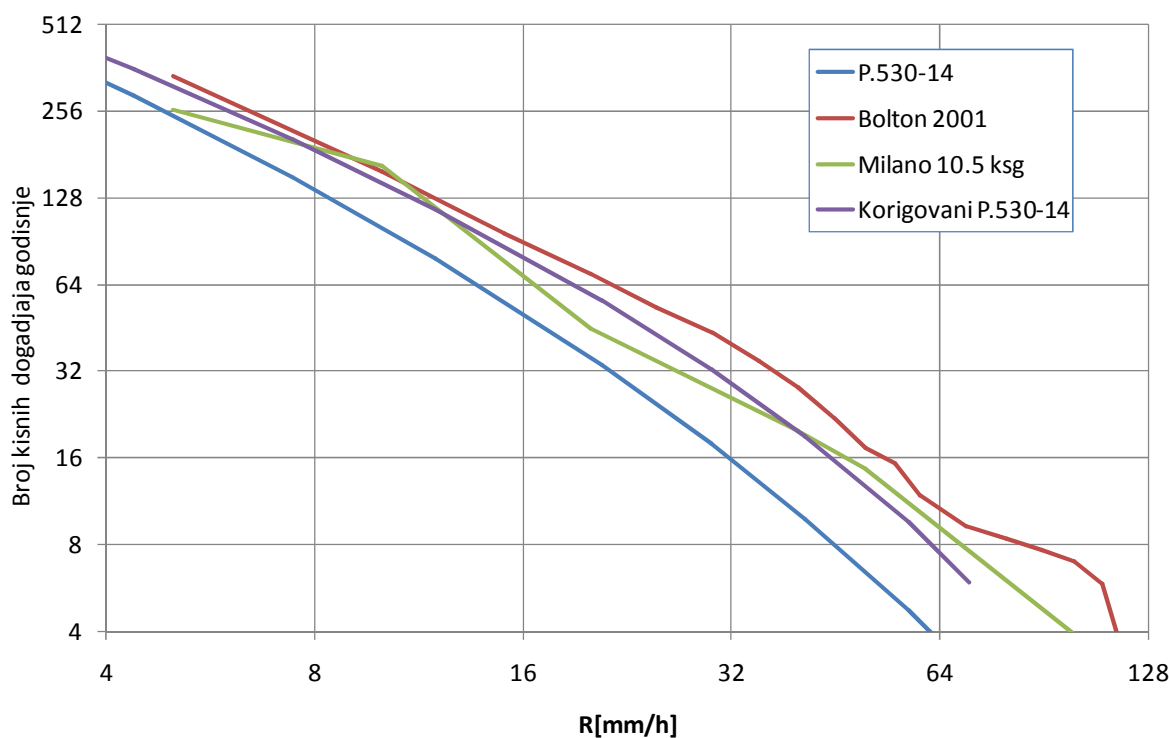
U ITU-R preporuci P.530-14 dat je približan izraz za procenu događaja u kome je prevaziđena određena dubina fedinga A u funkciji verovatnoće pojavljivanja date dubine fedinga $P(A_F > A)$:

$$N_{10s}(A) = 1 + 1313 \cdot [p(A)]^{0.945}. \quad (4.4)$$

koji je dobijen na osnovu interpolacije rezultata na većem broju veza od 12 do 83GHz i dužine od 1.2 do 43 km, na različitim geografskim područjima. Ovaj broj opisuje kišne pojave duž radio-relejne veze a ne u jednoj tački gde se nalaze kišna sonda, te je zbog prostorne

4. NOVI MODEL GODIŠNJE RASPODELE INTENZITETA KIŠE

raspodele intenziteta kiše očekivano da data vrednost bude manja od vrednosti zabeležene na kišnoj sondi. Data zavisnost upoređena je sa ponovno obrađenim rezultatima Bolton eksperimenta za 2001. godinu i rezultatima iz literature za područje u okolini grada Milano, Italija [Bonati 02]. Ona predstavlja prosečnu godišnju vrednost broja kišnih događaja za merenja obavljena sa prekidima u periodu od 1979-82, 1983-87 i 1992-97 godine (Sl. 4.4) u ukupnom trajanju od 10.5 kišnih godina. Sva tri rezultata ukazuju na stepeni zakon broja kišnih događaja u funkciji njihove verovatnoće. U cilju poklapanja sa rezultatima merenja na jednoj kišnoj sondi stepen u izrazu (4.4) je korigovan sa 0.945 na 0.82 što je na Sl x.5. prikazano kao Korigovani P.530-14.



Sl. 4.4. Prosečni rezultati merenja i funkcije za procenu broja kišnih događaja u kojima je prevaziđena vrednost intenziteta kiše

Na taj način za procenu broja kišnih događaja N_R u kojima intenzitet kiše prevazilazi vrednost datog praga R_{th} je:

$$N_R = N_R(p) = 1 + 1313 p^{0.82}, \quad p = P(R < R_{th}). \quad (4.5)$$

Podaci vezani za brzinu kretanja kišnih masa u Bolton eksperimentu preuzeti su iz literature [Upton 02] (Sl. 2.15). U ovoj disertaciji usvojeno je da intenzitet brzine kretanja

kišne ćelije ima konstantnu komponentu v_{min} uvećanu za slučajnu komponentu koja ima Rejljevu raspodelu, sa parametrom maksimuma gustine funkcije verovatnoće σ . Funkcija gustine verovatnoće postaje:

$$f_v(v) = \begin{cases} \frac{v - v_{min}}{\sigma_w} \exp\left(-\frac{(v - v_{min})^2}{2 \cdot \sigma_w^2}\right), & v > v_{min} \\ 0, & v \leq v_{min} \end{cases} \quad (4.6)$$

Raspodela azimuta vektora brzine kretanja je karakteristika područja na kome je instalirana MRR70GHz u opštem slučaju se ne uklapa se ni u jedan analitički oblik. U nedostatku konkretnih podataka za dato geografsko područje, za preliminarni pororačun se može smatrati da je uniformna od 0 do 360°.

4.2. Opis algoritma za realizaciju novog metoda

Za analizu performansi mreža iznad 70GHz značajniji su intenziteti kiše koji više doprinose slabljenju signala, te je usvojena Gausova raspodela, koja je opisana izrazom (2.12), ako je parametar oblika kišne ćelije $ko=1$. Imajući u vidu različite rezultate u pogledu oblika osnove kišne ćelije i dodatni problem orijentacije kišne ćelije ukoliko bi se usvojio elipsasti oblik, usvojen je kružni oblik kišne ćelije. Sličan pristup primenjen je i za analizu na nižim frekvencijskim opsezima [Enjamio 07].

Inicijalna lokacija nastanka ovakve kišne ćelije u prostoru data je u pravougaonom koordinatnom sistemu je x_0, y_0 . Kišna ćelija se kreće nošena vetrom čiji vektor brzine ima intenzitetvi azimut θ . Na osnovu toga, komponente brzine u pravougaonom koordinatnom v_x i v_y sistemu su:

$$\begin{aligned} v_x &= v \cdot \sin \theta, \\ v_y &= v \cdot \cos \theta. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Koordinate centra kišne ćelije x_c, y_c se menjaju u toku vremena. Ova promena se može iskazati kao:

$$\begin{aligned} x_c &= v_x t + x_0 = v \cdot t \cdot \sin \theta + x_0, \\ y_c &= v_y t + y_0 = v \cdot t \cdot \cos \theta + y_0. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Rastojanje pozicije x, y u prostoru od centra kine ćelije, u pravougaonom koordinatnom je:

$$\rho = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} \quad (4.9)$$

Zamenom (4.8) i (4.9) u (2.12) dobija se promena intenziteta kiše u vremenu i prostoru uzrokovana jednom kišnom ćelijom:

$$R(x, y, t) = R_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{(x - v \cdot t \cdot \sin \theta - x_0)^2 + (y - v \cdot t \cdot \cos \theta - y_0)^2}{\rho_0^2}\right). \quad (4.10)$$

Intenzitet kiše se detektuje virtualnom kišnom sondom, koja se nalazi na koordinatama $x_{\text{vrg}}, y_{\text{vrg}}$. Pošto se kišna ćelija kreće pravolinijski, u toku trajanja kišne ćelije, VRG može da detektuje samo jedan interval vremena T_{th} u kome je prevaziđen granični intenzitet kiše R_{th} . Naravno, u slučaju da nije prevaziđena vrednost praga, trajanje ovog intervala je jednako nuli. Uz pretpostavku da je pozicija nastanka kišne ćelije x_0, y_0 dovoljno udaljena od kišne sonde, tako da kišna sonda u početnom trenutku ne detektuje prevazilaženje praga intenziteta kiše, već prekoračenje R_{th} nastaje kada se ćelija dovoljno približi, T_{th} se može izraziti kao:

$$T_{th} = \begin{cases} 0, & R_{th} \geq R_{\max} \\ 0, & R_{th} < R_{\max}, \rho_t^2 \cdot v^2 \leq (v_y \cdot x_r - v_x \cdot y_r)^2 \\ \frac{2\sqrt{\rho_t^2 \cdot v^2 - (v_y \cdot x_r - v_x \cdot y_r)^2}}{v^2}, & R_{th} < R_{\max}, \rho_t^2 \cdot v^2 > (v_y \cdot x_r - v_x \cdot y_r)^2, \end{cases} \quad (4.11)$$

pri čemu su radi jednostavnijeg zapisa uvedene smene:

$$\rho_t^2 = \rho_0^2 \cdot \ln(R_{th} / R_{\max}), x_r = x_{rg} - x_{ref}, y_r = y_{rg} - y_{ref},$$

a x_{ref} i y_{ref} , predstavljaju bilo koje tačke koje pripadaju putanji kišne ćelije, što, naravno, mogu biti i koordinate nastanka kišne ćelije x_0, y_0 .

Uslov dovoljnog rastojanja između mesta nastanka kišne ćelije i kišne sonde se može izraziti kao: $\rho_t^2 < x_r^2 + y_r^2$. Ukoliko centar kišne ćelije prolazi preko pozicije kišne sonde trajanje prevazilaženja praga intenziteta kiše postaje jednako: $T_{th} = 2\rho_t / v$.

Indikator da li je data kišna ćelija izazvala prevazilaženje vrednost praga intenziteta kiše, merenog na datoj kišnoj sondi δ_{th} je jednak jedinici ako $T_{th} > 0$ odnosno:

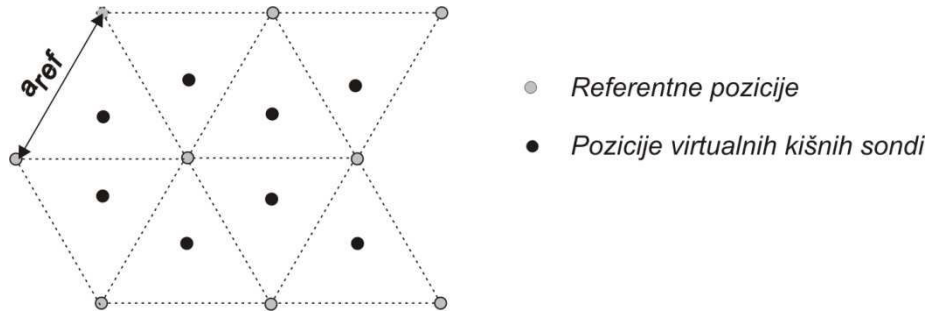
$$\delta_{th} = \begin{cases} 0, & R_{th} \geq R_{\max} \\ 0, & R_{th} < R_{\max}, C_t \cdot v^2 \leq (v_y \cdot x_r - v_x \cdot y_r)^2 \\ 1, & R_{th} < R_{\max}, C_t \cdot v^2 > (v_y \cdot x_r - v_x \cdot y_r)^2 \end{cases} \quad (4.12)$$

4. NOVI MODEL GODIŠNJE RASPODELE INTENZITETA KIŠE

Model kiše koji simulira godišnje statistike padavina bazira na generisanju skupa od N_{RC} kišnih ćelija čiji su parametri $x_{ref}(j)$, $y_{ref}(j)$, $R_{max}(j)$, $\rho_0(j)$, $v(j)$ i $\sigma(j)$, $j=1,...,N_{RC}$. Zbog dimenzija prostora na kome je instalirana MRR70GHz usvaja se da se u jednom trenutku na ovom području nalazi maksimalno jedna kišna ćelija.

Algoritam generisanja kišnih ćelija je sledeći:

1. Formira se inicijalni raspored od N_{ref} referentnih pozicija kišnih ćelija $x_{ref0}(m)$, $y_{ref0}(m)$, $m=1,...,N_{ref}$, tako da se formira struktura sastavljena od jednakokraničnih trouglova (Sl 4.5). Najmanji konveksni poligon unutar čije površine se nalaze sve referentne pozicije mora u potpunosti da obuhvata prostor na kome je instalirana MRR70GHz. Dužina stranice svakog trougla je a_{ref} . Pokrivanje prostora je dobro ako je ispunjen uslov da je $a_{ref}/2 \leq \overline{\rho_0^{Gaus}}(R_{0,01})$, računato na osnovu izraza (2.14) i (2.15). Konvergencija algoritma je bolja, što je N_{ref} manje.
2. U težištu svakog od jednakokraničnih trouglova se postavlja VRG na kojoj će se testirati CDF intenziteta kiše i broj kišnih događaja (Sl 4.5). Broj VRG iznosi N^{VRG} . Pozicije VRG su označene kao $x_{vrg}(i)$, $y_{vrg}(i)$, $i=1,...,N^{VRG}$.



Sl 4.5. Referentne pozicije i pozicije VRG

3. U ovom koraku se generiše inicijalni skup kišnih ćelija podeljen na ukupno N_{ref} podskupova koji odgovaraju svakoj od referentnih pozicija. Svaki od ovih podskupova sadrži N_{RC}^{ref} kišnih ćelija čiji su parametri: $x^{ref}(m,j)$, $y^{ref}(m,j)$, $R_{max}^{ref}(m,j)$, $\rho_0^{ref}(m,j)$, $v^{ref}(m,j)$ i $\theta^{ref}(m,j)$, $j=1,...,N_{RC}^{ref}$. Pošto postoji N_{ref} ovakvih podskupova $m=1,...,N_{ref}$.

- 3.1. Parametri putanje kišnih ćelija koje pripadaju jednom skupu su takvi da putanja kišne ćelije sadrži odgovarajuću referentnu poziciju, odnosno da $x^{ref}(m,j)=x_{ref0}(m)$, $y^{ref}(m,j)=y_{ref0}(m)$, $j=1,...,N_{RC}^{ref}$, $m=1,...,N_{ref}$.

- 3.2. Na osnovu izraza (4.5) određuje se niz od N_{RC}^{ref} verovatnoća $p_{ref}(n)$, takvih da se dve susedne verovatnoće u nizu funkcije za procenu očekivanog broj kišnih događaja koji odgovaraju datim verovatnoćama (izraz 4.5) razlikuju za jedan, odnosno: $N_R(p_{ref}(n))=n$, $n=2,...,N_{RC}^{ref}$. Poslednji element u nizu odgovara maksimalnoj verovatnoći $p_{ref}(N_{RC}^{ref})=P_{imax}$. Pošto postoji neodređenost u izrazu 4.5, u smislu da se kiše beskonačno velikog intenziteta mogu pojaviti ali jedanput, usvojeno je da prvi element niza bude jednak drugom elementu. Usvajanje da je: $p_{ref}(1)=p_{ref}(2)$, ne unosi degradaciju modela ukoliko je ispunjen uslov da je $p_{ref}(2)<P_{imin}$. Pošto prema izrazu (4.5) $p_{ref}(2)$ iznosi 0.00015% vremena, ukoliko je $P_{imin}=0.001\%$ vremena uslov je ispunjen.
- 3.3. Nizu verovatnoća $p_{ref}(n)$, $n=1,...,N_{RC}^{ref}$ se pridružuju intenziteti kiša $R_{th}^{ref}(n)$, tako da $P(R>R_{th}^{ref}(n))=p_{ref}(n)$, $n=1,...,N_{RC}^{ref}$, na primer upotrebom izraza (4.2). U slučaju da su intenziteti kiše koji odgovaraju najvećim verovatnoćama premali (na primer manji od 10mm/h), poželjno je redukovati N_{RC}^{ref} , odnosno P_{imax} , jer se kišna ćelija malog intenziteta (tzv. stratiform kišna ćelija) nema pretpostavljene osobine oblika i kretanja [Bonati 99], te dobijeni rezultat performansi MRR70GHz ne bi imao važnost.
- 3.4. Za skup verovatnoća prevazilaženja referentnih pragova i vrednosti referentnih pragova na način opisan u koracima 3.2 i 3.3. može se modelovati kišnim ćelijama čiji intenzitet kiše u centru kišne ćelije zadovoljava relaciju:

$$R_{th}^{ref}(l-1) \geq R_{max}^{ref}(m,l) > R_{th}^{ref}(l), l=3,...,N_{RC}^{ref}, m=1,...,N_{ref}. \quad (4.13)$$

Pošto su vrednosti susednih referentnih pragova bliske, kako prečnik kišne ćelije ne bi bio prevelik, usvojena je jednakost da:

$$R_{max}^{ref}(m,l) = R_{th}^{ref}(l-1), l=3,...,N_{RC}^{ref}, m=1,...,N_{ref}. \quad (4.14)$$

Vrednosti parametara $R_{max}^{ref}(m,1)$ i $R_{max}^{ref}(m,2)$, $m=1,...,N_{ref}$ će biti naknadno određeni, optimizacionim postupkom uz poštovanje uslova da su veći od praga $R_{th}^{ref}(1)=R_{th}^{ref}(2)$.

- 3.5. Intenziteti brzina svake od ćelija $v(m,j)$, $j=1,...,N_{RC}^{ref}$, $m=1,...,N_{ref}$ se generišu generatorom slučajnih brojeva pretpostavljene raspodele, na primer date izrazom (4.6). Opciono može se uvesti i zavisnost brzine kišne ćelije od maksimalnog intenziteta kiše u centru kišne ćelije, pošto su oni izračunati u

koraku 3.4, pošto eksperimentalni rezultati ukazuju da se kišne ćelije većeg intenziteta kreću brže [Akuon 11].

- 3.6. Za svaki od ukupno N_{ref} skupova ćelija se na osnovu pretpostavljenih maksimalnih intenziteta kiše određenih u koraku 3.4 i brzina kretanja ćelija dobijenih u koraku 3.5. određuju karakteristični prečnici ćelije $\rho_0^{ref}(m,j)$, $j=1,...,N_{RC}^{ref}$, $m=1,...,N_{ref}$ tako da bude ispunjen uslov simulacije verovatnoće prevazilaženja referentnih pragova na godišnjem nivou. Svaki skup se posmatra sam za sebe, odnosno efekat da kišna ćelija generisana tako da njen centar prolazi preko referentne kišne sonde datog skupa kišnih ćelija, može praviti doprinos ukupnom vremenu prevazilaženja pragova na drugim kišnim sondama se ne uzima u obzir u ovoj fazi. Zbog toga se ovaj korak obavlja m puta za svako m iz skupa $m \in \{1,...,N_{ref}\}$.

Ukupno vreme prevazilaženja n -tog referentnog praga intenziteta kiše $R_{th}^{ref}(n)$, od svih kišnih ćelija iz datog skupa, označeno kao $T_{th}(n,m)$, dobija se jednostavnim sabiranjem doprinosa ovom vremenu koje potiče od svake pojedinačne ćelije iz tog skupa ponaosob: $T_{th}(n,l,m)$, $l=1,...,N_{RC}^{ref}$, pri čemu prvi indeks n odgovara rednom broju referentnog praga, drugi indeks rednom broju kišne ćelije u tekućem referentnom skupu, a treći indeks m rednom broju skupa. Kako je $T_{th}(n,l,m)=0$, za $l>n$, onda ova suma postaje:

$$\begin{aligned} T_{th}(n,m) &= \sum_{l=1}^{N_{RC}} T_{th}(n,l,m) = \sum_{l=1}^{n-1} T_{th}(n,l,m) + T_{th}(n,n,m) + \sum_{l=n+1}^{N_{RC}} T_{th}(n,l,m) \\ &= \sum_{l=1}^{n-1} T_{th}(n,l,m) + T_{th}(n,n,m), \quad n = 1,...,N_{RC}^{ref} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Iz uslova simulacije CDF intenziteta kiše na godišnjem nivou:

$$p_{ref}(n) = \frac{T_{th}(n,m)}{T_{godina}} = \frac{T_{th}(n,m)}{3.16 \cdot 10^7 s} \quad (4.16)$$

Zbog oblika pretpostavljenog Gausovskog profila kišne ćelije, postoji efekat povećanja trajanja prevazilaženja pragova intenziteta kiše, odnosno: $T_{th}(n,l,m) < T_{th}(n+1,l,m) < ... < T_{th}(N_{RC}^{ref},l,m)$, ako $n \geq l$ i naravno m fiksirano. Ovaj efekat čini da bi se direktnom zamenom izraza (4.11) u sisteme jednačina (4.15) i (4.16) dobio nelinearan sistem od ukupno $N_{RC}^{ref}(N_{RC}^{ref}-1)/2+1$ jednačina. Međutim, ovaj sistem jednačina se može približno rešiti iterativnim

postupkom usvajanjem aproksimacije da je samo za prve dve ćelije, koje imaju jednak, ali u koraku 3.4 još neodređen R_{max} , efekat povećanja trajanja ne postoji odnosno: $T_{th}(n,1,m)=T_{th}(n,2,m)=T_{th0}$, $n=1,...,N_{RC}^{ref}$. Pošto ove ćelije imaju jednak maksimalni intenzitet kiše u centru kišne ćelije, pri čemu na osnovu (4.12) vreme njegovog prevazilaženja iznosi: $T_{th0}=T_{godina} p_{ref}(2)/2$. Za ostale ćelije se počev od $n=3$ jednostavnom zamenom određuje se $\rho_0^{ref}(m,j)$:

$$\rho_0^{ref}(n,m) = \frac{2 \cdot v^{ref}(n,m)}{\sqrt{\ln(R_{th}^{ref}(n)/R_{max}^{ref}(n,m))}} T_{th}(n,n,m),$$

$$T_{th}(n,n,m) = T_{godina} \cdot p_{ref}(n) - \sum_{l=3}^{n-1} T_{th}(n,l,m) + T_{th}(n,n,m) + 2T_{th0}, \quad (4.17)$$

$$n = 3, ..., N_{RC}^{ref}.$$

- 3.7. Poslednji koraku formiranju referentnih skupova kišnih ćelija koji zavisi od prethodnih korakaje određivanje parametara kišnih ćelija najvećeg intenziteta $R_{max}^{ref}(m,1)=R_{max}^{ref}(m,2)$, odnosno $\rho_0^{ref}(m,1)=\rho_0^{ref}(m,2)$, za svaki od referentnih skupova $m \in \{1, ..., N_{ref}\}$. Da bi uslovi (4.15) i (4.16) bili ispunjeni, ali tako da sve ćelije imaju Gausovski opseg, prvih N_{opt} ćelija će imati iste parametre: $R_{max}^{ref}(m,1)=...=R_{max}^{ref}(m,N_{opt})=R_{max}^{opt}(m)$, $\rho_0^{ref}(m,1)=...=\rho_0^{ref}(m,N_{opt})=\rho_0^{opt}(m)$ i $v_{ref}(m,1)=...=v_{ref}(m,N_{opt})=v_{ref}^{opt}(m)$, što praktično znači modifikaciju parametara kišnih ćelija čiji su indeksi $3, ..., N_{opt}$. Ukoliko se poštuje uslov da je $p_{ref}(N_{opt}) < P_{imin}$, ova modifikacija neće narušavati opseg važnosti modela od P_{imin} do P_{imax} . Imajući u vidu izraz (4.5), ako se usvoji $P_{imin}=0.001\%$ vremena vrednost N_{opt} maksimalno može iznositi 5. Postupak optimizacije se ne obavlja za sve vrednosti $T_{th}(n,m)$, već samo za karakteristične vrednosti n koje odgovaraju ravnomerno raspodeljenim vrednostima verovatnoće $p_{ref}(n)$ po logaritamskoj skali u opsegu između P_{imin} i P_{imax} . Na primer ako se usvoji skup test vrednosti $\mathbf{P}_{ref}^{opt}=\{0.001, 0.002, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1\}$, onda $\mathbf{n}^{opt}=\{5, 9, 18, 31, 54, 113, 199\}$. Korišćenjem izraza (4.12), (4.15) i (4.16) optimizacioni kriterijum se može izraziti kao:

$$\min_{R_{\max}^{opt}(m), \rho_0^{opt}(m), v^{opt}(m)} \sum_{n \in \mathbf{n}^{opt}} \left| T_{godina} \cdot p_{ref}(n) - N_{opt} T_{th}(n, 1, m) - \sum_{l=N_{opt}+1}^n T_{th}(n, l, m) \right|,$$

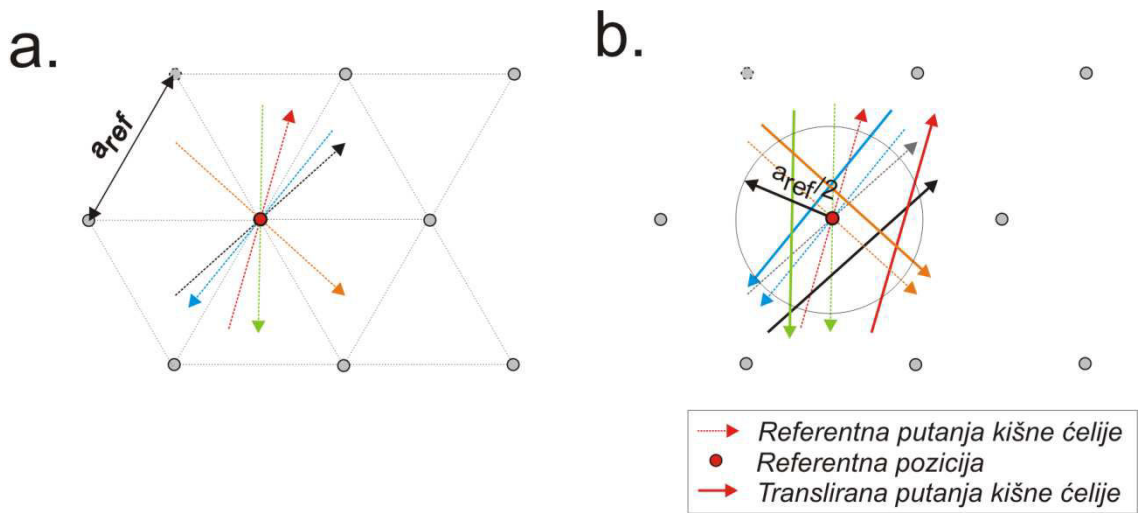
$$T_{th}(n, 1, m) = \frac{2 \cdot \rho_0^{opt}(m)}{v^{opt}(m)} \sqrt{R_{th}(n) / R_{\max}^{opt}(m)},$$

$$T_{th}(n, l, m) = \frac{2 \cdot \rho_0^{ref}(m, l)}{v^{ref}(m, l)} \sqrt{R_{th}(n) / R_{\max}^{ref}(m, l)}.$$
(4.18)

Praktično na jednom skupu kišnih ćelija (m -fiksirano) ukoliko optimizacioni kriterijum (4.18) ne konvergira, treba pokušati za sve moguće vrednosti N_{opt} (u konkretnom primeru to su samo 3, 4 i 5) i odabrati najbolji rezultat.

3.8. Pošto sve putanje referentnih kišnih ćelija sadrže poziciju kišne sonde, dobijeni rezultat simulacije CDF intenziteta kiše i broja kišnih događaja se neće menjati bez obzira na raspodelu azimuta vektora brzine. Zbog toga se parametar $\theta^{ref}(m, j)$, $j=1, \dots, N_{RC}^{ref}$ za svaki N_{ref} podskupova $m=1, \dots, N_{ref}$, bira jednostavno generatorom slučajnih brojeva željene raspodele.

4. U ovom koraku se svi referentni skupovi kišnih ćelija integrišu u jedan zajednički skup od $N_{RC}=N_{RC}^{ref} N_{ref}$ kišnih ćelija koji će reprezentovati godišnje padavine. Pri integraciji podskupova ćelija putanja svake od ćelija se translira za slučajnu vrednost uniformno raspoređena između $-a_{ref}/2$ i $a_{ref}/2$. Na taj način se dobija ravnomerno prebrisavanje prostora na kome je instalirana MRR70GHz, što je ilustrovano na Sl.4.6.



Sl 4.6. Transliranje putanje kišnih ćelija iz jednog skupa referentnih ćelija

Dodatno svih N_{ref} skupova kišnih ćelija se integriše u jedinstven skup od $N_{RC} = N_{ref} \cdot N_{RC}^{ref}$ kišnih ćelija. Formalno integracija referentnih skupova može se zapisati kao:

$$\begin{aligned}
 x^{RC}((m-1)N_{ref}^{RC} + j) &= x_{ref}(m, j) \cdot a(m, j) \cdot \cos(\theta^{ref}(m, j)), \\
 y^{RC}((m-1)N_{ref}^{RC} + j) &= x_{ref}(m, j) \cdot a(m, j) \cdot \sin(\theta^{ref}(m, j)), \\
 R_{max}^{RC}((m-1)N_{ref}^{RC} + j) &= R_{max}^{ref}(m, j), \\
 \rho_0^{RC}((m-1)N_{ref}^{RC} + j) &= \rho_0^{ref}(m, j), \\
 v^{RC}((m-1)N_{ref}^{RC} + j) &= v^{ref}(m, j), \\
 \theta^{RC}((m-1)N_{ref}^{RC} + j) &= \theta^{ref}(m, j), \\
 j &= 1, \dots, N_{RC}^{ref}, m = 1, \dots, N_{ref}.
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

- Počev od ovog koraka kvalitet simulacije godišnjeg intenziteta kiše se posmatra samo na pozicijama VRG, a ne na referentnim tačkama. U proceni kvaliteta aproksimacije ovih statističkih karakteristika posmatraju se samo prevazilaženja N^{TH} pragova intenziteta kiše čije su vrednosti $R_{th}(k)$, $k=1, \dots, N_{th}$, verovatnoće prevazilaženja $p_{th}(k)$, kojima odgovaraju ukupna trajanja prevazilaženja $T_{th}(k) = p_{th}(k) T_{godina}$. Očekivani broj kišnih događaja je $N_{th}(k)$, $k=1, \dots, N^{TH}$. Sa ovim ciljnim vrednostima se porede simulirane vrednosti koje se dobijaju usrednjavanjem rezultata na svim kišnim sondama, te se apsolutne greške $\Delta R(k)$ i $\Delta N(k)$ mogu izraziti kao:

$$\begin{aligned}
 \Delta_R(k) &= \frac{1}{N_{VRG}} \sum_{i=1}^{N_{VRG}} \sum_{j=1}^{N_{RC}^{ref}} T_{th}(k, j, i) - T_{th}(k), k = 1, \dots, N^{TH}, \\
 \Delta_N(k) &= \frac{1}{N_{VRG}} \sum_{i=1}^{N_{VRG}} \sum_{j=1}^{N_{RC}^{ref}} \delta_{th}(k, j, i) - N_{th}(k), k = 1, \dots, N^{TH},
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

pri čemu je sa $T_{th}(k, j, i)$ označeno vreme prevazilaženja k -tog praga, uzrokovanog j -tom kišnom ćelijom koje se detektuje na i -toj VRG i određuje se izrazom (4.11). Na sličan način je sa $\delta_{th}(k, j, i)$ označen indikator prevazilaženja k -tog praga, uzrokovanog j -tom kišnom ćelijom koje se detektuje na i -toj VRG i određuje se izrazom (4.12).

Zbog postupka integracije referentnih skupova kišnih ćelija u koraku 4., za očekivati je da se za vrednosti velikih pragova intenziteta kiše dobijaju niže vrednosti od željenih jer maksimumi intenziteta kiše ne prelaze preko pozicije kišnih sonde. Sa druge strane, za kišne ćelije manjeg intenziteta, a većeg prečnika, dolazi do efekta da jedna kišna ćelija

daje doprinos na većem broju kišnih sondi te se dobijaju veće vrednosti od očekivanih. Da bi se ovaj problem prevazišao uvode se korekcionni faktori $c_R(k)$, $k=1,...,N^{TH}$ kojima se množe $R_{max}^{RC}(j)$, $j=1,..., N^{RC}$ i dobijaju korigovane vrednosti intenziteta kiše u centru kišnih ćelija $R_{max}^{RCC}(j)$, $j=1,..., N^{RC}$ na sledeći način:

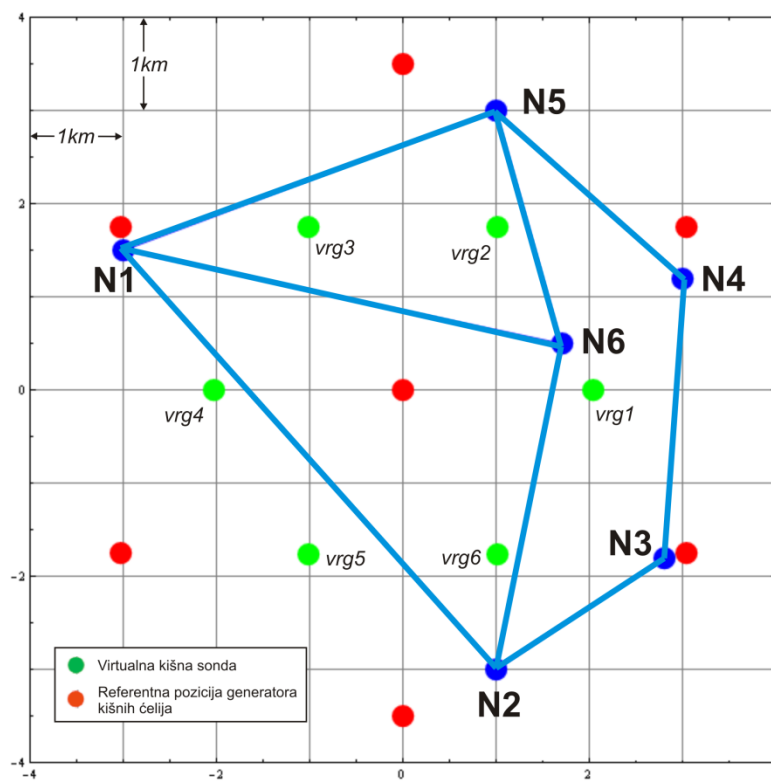
$$R_{max}^{RCC}(j) = \begin{cases} c_R(1) \cdot R_{max}^{RC}(j), & R_{max}^{RC}(j) > R_{th}(1) \\ c_R(k) \cdot R_{max}^{RC}(k), & R_{th}(k-1) \leq R_{max}^{RC}(j) < R_{th}(k), k = 2,...,N^{TH} \end{cases} \quad (4.20)$$

Vrednosti $c_R(k)$, $k=1,...,N^{TH}$ se optimizuju tako da se odstupanja iz izraza 4.19 svedu unutar specificiranih tolerancija. Na osnovu rezultata Bolton eksperimenta (Sl 4.1) tolerancije za prag koji odgovara verovatnoći 0.01% vremena treba da budu do oko 10% u odnosu na ciljnu vrednost, a za ostale pragove se mogu tolerisati i veća odstupanja do oko 50%.

6. Modifikacija R_{max} urađena u koraku 5. uzrokuje da određeni broj kišnih ćelija neće imati doprinos ni na jednoj VRG. Praktično sve kišne ćelije čije je $\sum_{i=1}^{N^{VRG}} \sum_{j=1}^{N^{RC}} \delta_{th}(N^{TH}, j, i) = 0$ se uklanjaju iz finalnog skupa kišnih ćelija.

5. IMPLEMENTACIJA NOVOG METODA I NUMERIČKI REZULTATI

Analiza performansi mreže data je na primeru mreže sa slike 5.1. Ova mreža se sastoji od šest čvorišta u kojima su smešteni usmerivači, obeleženi sa N1,...,N6. Čvorišta su međustobno povezana sa ukupno šesnaest jednosmernih veza (osam dvosmernih veza) označenih u formi: izvorišni čvor - odredišni čvor (na primer N1-N2). Dužine veza iznose od 2.2 do 6.0km.



Sl.5.1. Topologija mreže, pozicije referentnih tačaka i VRG

Pretpostavljeno je da intenzitet kiše prevaziđen u 0.01% vremena iznosi 30mm/h. U skladu sa tim, prema propagacijskom modelu ITU-T P.530-14 su odabrane rezerve za feding tako da svaka veza radi punim kapacitetom 99.95% vremena (Tabela 5.1). Pretpostavljeni pragovi prijema uređaja su isti kao u Tabeli 3.1, te su rezerve za feding za prvu redukciju

5. IMPLEMENTACIJA NOVOG METODA I NUMERIČKI REZULTATI

kapaciteta na 100Mbit/s za 10dB veće u odnosu na rezervu za feding za pun kapacitet veze. Na isti način, rezerve za feding za drugu redukciju kapaciteta na 10Mbit/s su za 20dB veće od rezervi za feding za pun kapacitet veze. Na osnovu ovih ulaznih podataka, prema propagacijskom modelu ITU-T P.530-14 određeni su procenti vremena u kojima veze rade sa redukovanim kapacitetima, kao i procenti neraspoloživosti (Tabela 5.1).

Tabela 5.1. Parametri pojedinačnih veza

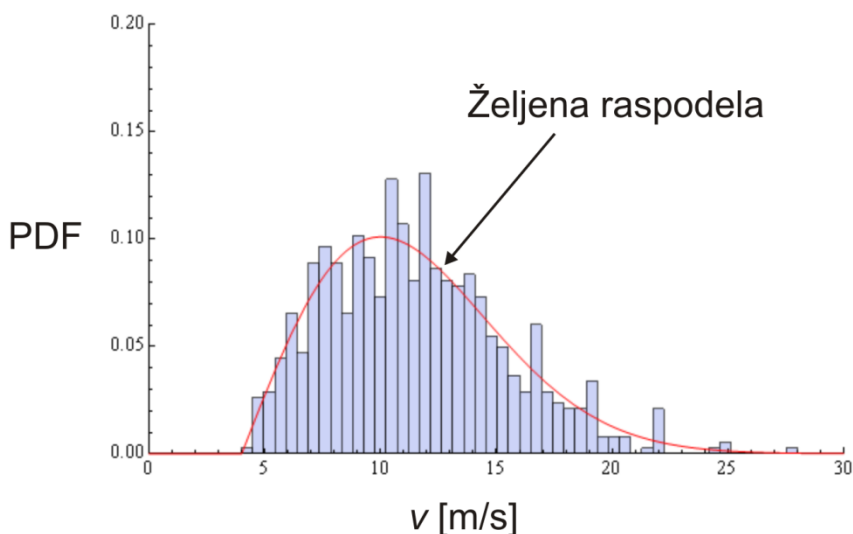
Veza	N1 - N2	N2 - N3	N3 - N4	N4 - N5	N5 - N1	N1 - N6	N5 - N6	N2 - N6
Dužina deonice [km]	6.0	2.2	3.0	2.7	4.3	4.8	2.6	3.6
Efektivna dužina deonice [km]	3.7	2.1	2.5	2.3	3.0	3.3	2.3	2.7
Rezerva za feding za protok 1Gbit/s [dB]	25.0	13.5	16.5	15.5	20.0	21.5	15.0	18.0
Rezerva za feding za protok 100Mbit/s [dB]	35.0	23.5	26.5	25.5	30.0	31.5	25.0	28.0
Rezerva za feding za protok 10Mbit/s [dB]	45.0	33.5	36.5	35.5	40.0	41.5	35.0	38.0
Vreme rada sa punim kapac. 1Gbit/s [%]	99.95	99.95	99.95	99.95	99.95	99.95	99.95	99.95
Vreme rada sa reduk.kapac. 100 Mbit/s [%]	0.0272	0.0365	0.0340	0.0350	0.0302	0.0291	0.0350	0.0321
Vreme rada sa reduk. kapac. 10 Mbit/s [%]	0.0111	0.0091	0.0098	0.0095	0.0109	0.0111	0.0096	0.0105
Vreme neraspoloživosti veze [%]	0.0117	0.0044	0.0062	0.0055	0.0089	0.0098	0.0054	0.0075

Na osnovu dobijenih rezultata, usvojeno je da opseg važnosti modela kiše treba da pokriva opseg od interesa od $P_{imin}=0.001\%$ do $P_{imax}=0.1\%$ vremena.

5.1. Rezultati simulacije godišnje raspodele intenziteta kiše

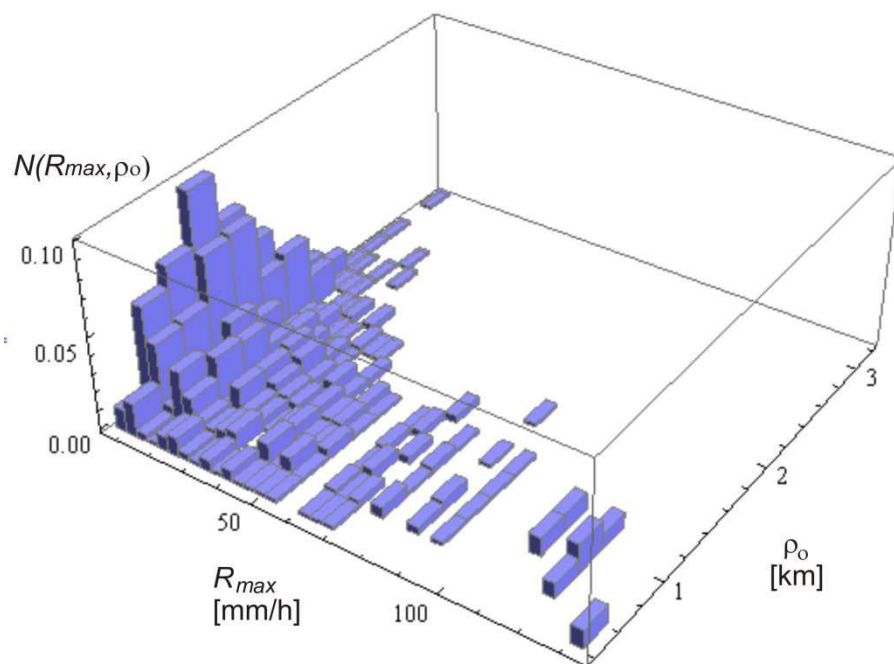
Za simulaciju godišnje raspodele intenziteta kiše, po algoritmu opisanom u poglavlju 5 formirana je mreža od ukupno sedam referentnih pozicija (Sl. 5.1.), koje pokrivaju prostor na kome je instalirana MRR70GHz. Pretpostavljeni su oblici kumulativne funkcije raspodele intenziteta kiše opisani izrazom (4.2) i broja kišnih događaja opisanih izrazom (4.4.), uz vrednost intenziteta kiše prevaziđenog u 0.01% vremena od 30mm/h. Da bi se simulirao opseg verovatnoća od 0.001% vremena do 0.1% vremena u skladu sa ovim usvojenim kišnim ćelijama potrebno je generisati 200 kišnih ćelija po referentnoj poziciji, te je za područje koje obuhvata cela mreža generisano 1400 kišnih ćelija.

Pretpostavljeno je da intenzitet brzine vetra ima slučajnu vrednost sa raspodelom datom izrazom 4.6, pri čemu parametar v_{min} iznosi 4m/s, a σ_v iznosi 10m/s. Histogram generisanih odmeraka intenziteta brzine prikazan je na Sl. 5.2.



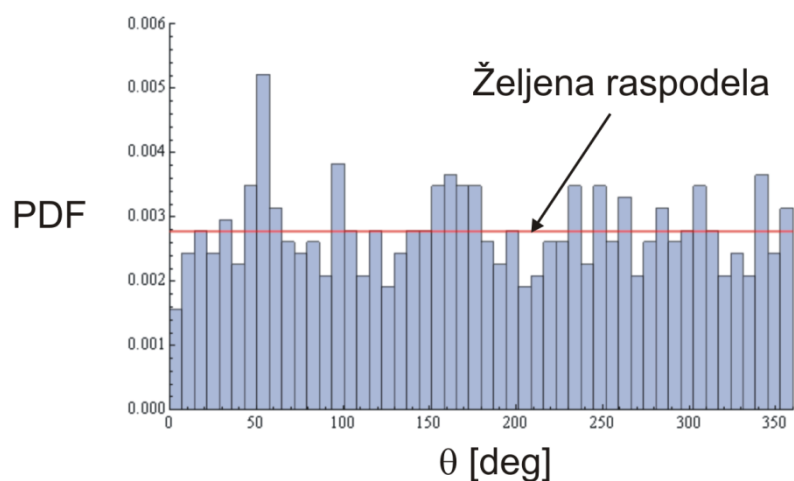
Sl.5.2. Histogram raspodele intenziteta brzine kretanja kišnih ćelija

Posledica generisanih maksimalnih intenziteta kiše i usvojenog skupa brzina kišnih ćelija su vrednosti karakterističnog rastoranja ρ_o , čija je uslovna gustina verovatnoće u odnosu na maksimalni intenzitet kiše u centru kišne ćelije R_{max} , prikazana na slici 5.3. Trend da kišnim ćelijama većeg intenziteta odgovara manji ρ_o je blago izražen.



Sl.5.3. Zavisnost karakterističnog rastojanja ρ_0 od intenziteta kiše u centru kišne ćelije R_{max}

Dimenzija stranice elementarnog trougla a_{ref} je 3.2km što je manje od dvostruke prosečne vrednosti karakterističnog rastojanja za intenzitet kiše prevaziđen u 0.01% vremena koje na osnovu izraza (2.14) iznosi 1.9km, te je ispunjen uslov za osiguranje konvergencije koraka dodele slučajnog azimuta vektorima brzina ćelija i translacije njihovih pravaca. Pretpostavljena je uniformna raspodela azimuta brzina svih ćelija (Sl. 5.5.)

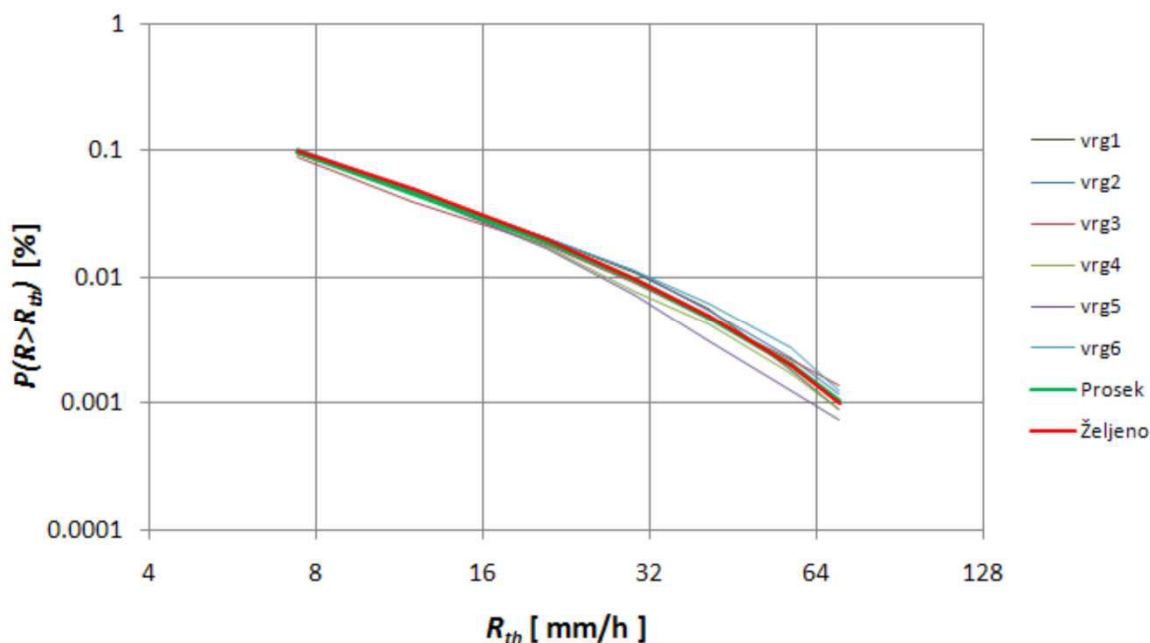


Sl.5.4. Histogram raspodele azimuta brzine kretanja kišnih ćelija

5. IMPLEMENTACIJA NOVOG METODA I NUMERIČKI REZULTATI

Po završenom koraku translacije pravaca kišnih ćelija, testirani su intenziteti kiše na ukupno šest VRG, označene kao vrg1,...,vrg6, čije su pozicije prikazane na Sl 5.1. Posmatrano je prevazilaženje ukupno $N^{TH}=7$ vrednosti karakterističnih pragova koji odgovaraju verovatnoćama $p_{th}(k)$: 0.001, 0.002, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1. Njihovi odgovarajući pragovi intenziteta kiše $R_{th}(k)$ su: 70.3, 57.5, 40.9, 30.0, 20.8, 11.8 i 7.4mm/h. Da bi se minimizovala vrednost odstupanja optimizacionim postupkom izračunate su vrednosti $c_R(k)$ iznose: 1.05, 1.1, 0.98, 0.92, 0.87, 0.73 i 0.42. Kao posledica toga od ukupno 1400 kišnih ćelija, preostalo je 798 kišnih ćelija, koje na bar jednoj VRG prevaziđu vrednost najnižeg praga intenziteta kiše od 7.4mm/h.

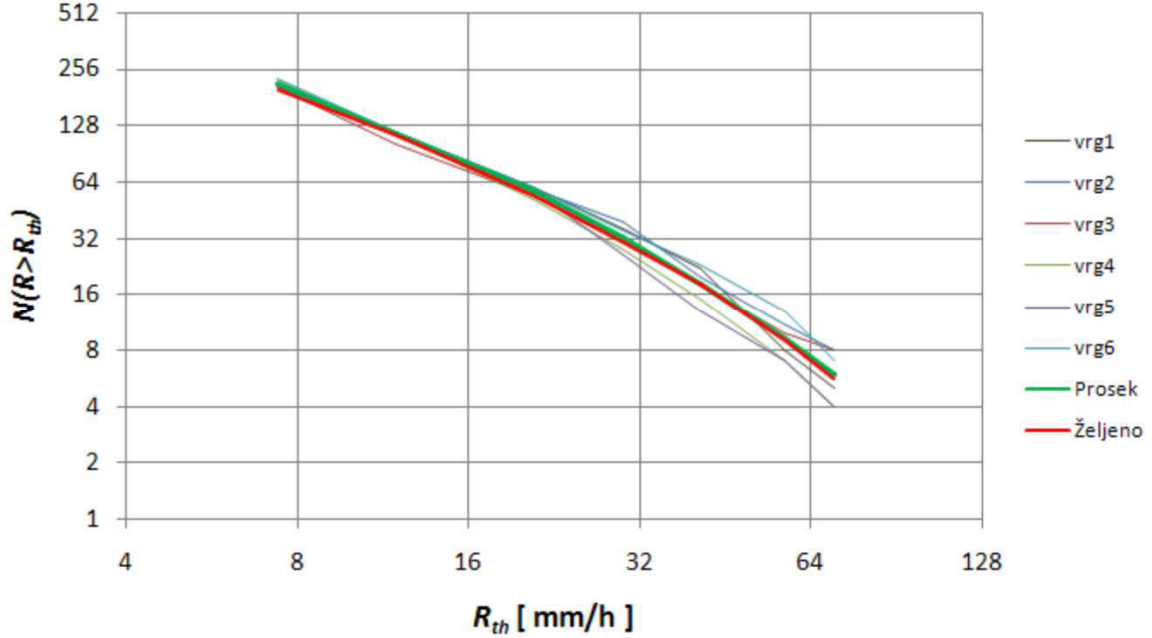
Kumulativna funkcija raspodele na svih šest VRG, prosečna vrednost i željena vrednost prikazane su na Sl. 5.5. Prosečna vrednost odstupa od željene vrednosti za manje od 3% u celom opsegu od interesa od 0.001% do 0.1% vremena. Odstupanja vrednosti izmerenih na individualnim sondama su za intenzitete kiše do 30mm/h ispod 5%, a za veće intenzitete kiše ne prevazilaze 20%, što je bolje uklapanje nego u slučaju realnih rezultata merenja u Bolton eksperimentu (Sl 4.1.)



Sl.5.5. Simulirana godišnja raspodela intenziteta kiše

Prosečni broj kišnih događaja detektovanih na kišnim sondama odstupa od željenog za manje od 3% (Sl. 5.5.). Individualna odstupanja detektovana na kišnim sondama su manja od

5% za vrednosti intenziteta kiše do 25mm/h, a za veće vrednosti se kreću do 35%, što je takođe bolje nego rezultati merenja (Sl. 4.3).



Sl.5.6. Simulirani broj kišnih događaja

Na taj način potvrđeno je da skup od $N_{RC}=798$ kišnih ćelija na posmatranoj teritoriji, verno simulira pretpostavljene kumulativne funkcije raspodele intenziteta kiše, broja kišnih događaja određenog intenziteta, raspodelu intenziteta i smera brzine vetra, te se može koristiti za simulaciju uticaja kiše na fizičkom i mrežnom sloju u datoj mreži.

5.2. Implementacija analize na fizičkom sloju i rezultati

U procesu simulacije na fizičkom sloju potrebno je za svaku od veza u mreži odrediti trenutke prevazilaženja odgovarajućih pragova prijemnog signala na kojima dolazi do redukcije kapaciteta date veze. Praktično svakoj kišnoj ćeliji se pridružuje lista promena $\mathbf{cc}_{RC}(i)$, $i=1, \dots, N_{RC}$ sa trenucima prelaska pragova čiji je oblik:

$$\mathbf{cc}_{RC}(i) = \{ \{rbv_{i,1}, tf_{i,1}, c_{i,1}, in_{i,1}\}, \dots, \{rbv_{i,j}, tf_{i,j}, c_{i,j}, in_{i,j}\}, \dots, \{rbv_{i,m(i)}, tf_{i,m(i)}, c_{i,m(i)} = C_o(rbv_{i,m(i)}), in_{i,m(i)}\} \}, \quad (5.1.)$$

gde su:

$rbv_{i,j}$ - redni broj veze $rbv_{i,j} \in \{1, \dots, E\}$

$tf_{i,j}$ - trenutak promene na fizičkom sloju,

$c_{i,j}$ - novi kapacitet veze $rbv_{i,j}$

$in_{i,j}$ - indikator vrste promene $in_{i,j} \in \{"c", "ls"\}$

$m(i)$ - dužina liste promena na fizičkom sloju izazvane i -tom kišnom ćelijom

Trenuci su sortirani $tf_{i,1} < \dots < tf_{i,j} < \dots < tf_{i,m(i)}$, tako da je prvi zapisani trenutak $tf_{i,1}$ trenutak kad dolazi do prve redukcije kapaciteta na nekoj od veza u mreži uzrokovanog i -tom kišnom ćelijom, a $tf_{i,m(i)}$ je trenutak kad je i -ta kišna ćelija napustila prostor na kome je instalirana MRR70GHz i kapacitet svih veza se vratio na nominalnu vrednost.

Indikatori vrste promene $in_{i,j}$ namenjeni su za pojednostavljenje simulacije na mrežnom nivou. U listi $cc_{RC}(i)$ imaju vrednosti "c" što označava promenu kapaciteta ili "ls" koja označava promenu stanja veza.

Određeni broj kišnih ćelija ne izaziva promenu na fizičkom nivou ni na jednoj RR70GHz, te su njihove liste $cc_{RC}(i)$ prazne. Ove liste se ne uzimaju u obzir u simulacijama, budući da je ponašanje mreže pod njihovim uticajem identično ponašanju mreže u odsustvu fedinga. Broj kišnih ćelija koje izazivaju promene kapaciteta veza u mreži označen je sa N_{RC}^{CC} .

U konkretnom primeru od ukupno $N_{RC}=798$ kišnih ćelija njih $N_{RC}^{CC}=297$ izaziva promene u mreži. Ukupno trajanje vremena u kome se dešavaju redukcije kapaciteta iznose 87481s za godinu dana, što odgovara procentu vremena od 0.2774%. Ova vrednost prevazilazi maksimalnu vrednost opsega od interesa od $P_{imax}=0.1\%$ vremena, te se mora uzeti u obzir pri tumačenju rezultata simulacije na mrežnom sloju, dok za performanse na fizičkom sloju nema značaja.

Na osnovu lista $cc_{RC}(i)$, $i=1, \dots, N_{RC}^{CC}$ su određene performanse svake od RR70GHz u mreži i na osnovu njih određene su vrednosti vremena rada sa punim kapacitetom 1Gbit/s, redukovanim kapacitetima na 100Mbit/s, odnosno 10Mbit/s (Tabela 5.2.). Simulacija pokazuje da redukcija kapaciteta i pojava neraspoloživosti veze postoje na svakoj od veza u mreži.

Analiza razlika između rezultata simulacije i rezultata dobijenih primenom modela propagacije ITU-R P.530-14 prikazana je u tabeli 5.3. Pored relativnog odstupanja procenata vremena u kojima su prevaziđeni pragovi za 1Gbit/s, 100Mbit/s i 10Mbit/s izračunate su i potrebne korekcije rezerve za feding, koje bi trebalo uneti da bi model propagacije ITU-R P.530-14 dao isti rezultat kao simulacija pomerajućih kišnih ćelija sa originalnim vrednostima

5. IMPLEMENTACIJA NOVOG METODA I NUMERIČKI REZULTATI

marginu za feding. U cilju poređenja rezultata za različite dužine deonica vrednosti korekcija su date za celu trasu u [dB] i normalizovano u odnosu na dužinu trase u [dB/km].

Tabela 5.2. Rezultati simulacije RR deonica na fizičkom sloju

Veza		N1 - N2	N2 - N3	N3 - N4	N4 - N5	N5 - N1	N1 - N6	N5 - N6	N2 - N6
Dužina deonice	[km]	6.0	2.2	3.0	2.7	4.3	4.8	2.6	3.6
Vreme rada sa punim kap. 1Gbit/s	[%]	99.9568	99.9638	99.9464	99.9517	99.9426	99.9456	99.9520	99.9505
Vreme rada sa reduk. 100 Mbit/s	[%]	0.0289	0.0280	0.0364	0.0363	0.0364	0.0360	0.0354	0.0330
Vreme rada sa reduk. 10 Mbit/s	[%]	0.0091	0.0062	0.0137	0.0084	0.0129	0.0102	0.0082	0.0108
Vreme nerasploš. veze	[%]	0.0052	0.0020	0.0035	0.0035	0.0082	0.0082	0.0044	0.0056

Tabela 5.3. Analiza razlika u rezultatima simulacije i modela propagacije ITU-R P.530-14 na fizičkom sloju

Veza		N1 - N2	N2 - N3	N3 - N4	N4 - N5	N5 - N1	N1 - N6	N5 - N6	N2 - N6
Dužina deonice	[km]	6.0	2.2	3.0	2.7	4.3	4.8	2.6	3.6
Rezerva za feding za protok 1Gbit/s	[dB]	25.0	13.5	16.5	15.5	20.0	21.5	15.0	18.0
Odstupanje u odnosu na P.530 za prag prijema za 1Gbit/s	[%]	16	38	-7	4	-13	-8	4	1
	[dB]	1.6	2.4	-0.6	0.2	-1.1	-0.7	0.4	0.2
	[dB/km]	0.3	1.1	-0.2	0.1	-0.3	-0.1	0.2	0.1
Rezerva za feding za protok 100Mbit/s	[dB]	35.0	23.5	26.5	25.5	30.0	31.5	25.0	28.0
Odstupanje u odnosu na P.530 za prag prijema za 100Mbit/s	[%]	-60	-46	-7	26	-6	14	19	9
	[dB]	-6.8	-4.4	-0.7	2.1	-0.7	1.6	1.6	0.9
	[dB/km]	-1.1	-2.0	-0.2	0.8	-0.2	0.3	0.6	0.3
Rezerva za feding za protok 10Mbit/s [dB]	[dB]	45.0	33.5	36.5	35.5	40.0	41.5	35.0	38.0
Odstupanje u odnosu na P.530 za prag prijema za 10Mbit/s	[%]	-125	-116	-78	-58	-9	-20	-23	-33
	[dB]	-13.2	-7.1	-6.3	-4.4	-1.2	-2.6	-2.1	-3.3
	[dB/km]	-2.2	-3.3	-2.1	-1.6	-0.3	-0.5	-0.8	-0.9

Izračunata odstupanja (Tabela 5.3.) pokazuju dobro slaganje između rezultata simulacije i modela propagacije ITU-R P.530-14 u slučajevima da je rezerva za feding manja od oko 35dB. U ovim slučajevima razlike se kreću od 1% do 46%, čemu odgovaraju varijacije rezerve za feding od 0.2dB do 7.1dB. Ekstremni slučajevi odstupanja od -125% i -116% odgovaraju najdužoj i najkraćoj deonici pri velikim rezervama za feding. Ove varijacije su očekivane jer model ITU-R P.530-14 simulira neuniformnu raspodelu intenziteta kiše približnom metodom efektivne dužine deonice (izraz (2.12)). U slučajevima velikih vrednosti rezervi za feding model ITU-R P.530-14 daje lošije vrednosti performansi RR70GHz u odnosu na simulaciju pomerajućih kišnih ćelija. Normalizacija potrebne korekcije rezerve za feding sa dužinom deonice nije pokazala novu korelisanost. Imajući u vidu tolerancije karakteristika radio-relejne opreme [TS 102 524], koja za sve parametre koji figurišu u izrazu za rezervu za feding (2.8), iznose od $\pm 1\text{dB}$ do $\pm 2\text{dB}$, dobijena odstupanja se mogu smatrati prihvatljivim za praktičnu primenu.

5.3. Implementacija analize na mrežnom sloju i rezultati

Za analizu performansi na mrežnom sloju potrebno pretpostavljena su tri algoritma za preusmeravanje paketa u slučaju promena na fizičkom sloju:

- a. standardni OSPF sa podrazumevano (engl. *default* - def) postavljenim parametrima [RFC 2328], koji je označen kao def OSPF.
- b. modifikovani OSPF sa dodavanjem zaštitnih putanja po NOPHY algoritmu [Peric IEEE CL 10], koji je označen kao OSPF+NOPHY. Ovaj mehanizam zaštite se može implemetirati komercijalno raspoloživom radio-relejnou i usmeračkom opremom upotrebom MPLS-TE tehnologije [Perić-D-Telfor 2012].
- c. hipotetički idealni protokol usmeravanja koji reaguje na svaku promenu kapaciteta u mreži i usmerava pakete po najkraćoj putanji (engl. *capacity change reroute* - ccr) [Peric SPECTS 07] [Peric IEEE CL 10], koji je označen kao ccr OSPF.

Za svaki od ovih protokola izvršene su analize KPI C-OU i C-FCD na godišnjem nivou za vremena integracije T_0 od 1s, 10s i 60s.

5.3.1. Implementacija dinamičke simulacije

Za dinamičku simulaciju performansi mreže se za svaku kišnu ćeliju na osnovu liste promena na fizičkom sloju $\mathbf{cc}_{RC}(i)$, $i=1,...,N_{RC}$ formira lista reakcija mreže $\mathbf{nr}_{RC}(i)$, $i=1,...,N_{RC}^{CC}$ čiji elementi imaju oblik:

$$\mathbf{nr}_{RC}(i) = \{ \{ Null, tr_{i,1}, Null, ir_{i,1} \}, ..., \{ Null, tr_{i,j}, Null, ir_{i,j} \}, ..., \{ Null, tr_{i,m(i)}, Null, ir_{i,m(i)} \} \}, \quad (5.2.)$$

gde su:

$Null$ - indikator praznog sadržaja,

$tr_{i,j}$ - trenutak reakcije i

$ir_{i,j}$ - indikator vrste reakcije $ir_{i,j} \in \{ "", "r" \}$.

Trenuci reakcije se uvek dešavaju posle vremena reakcije T_R u odnosu na promenu na fizičkom sloju $tr_{i,j} = tf_{i,j} + T_R$. Vrsta reakcije mreže opisana je indikatorom reakcije i može biti preusmeravanje označeno sa "r" ili bez reakcije označeno sa "". Indikatori praznog sadržaja $Null$ su uvedeni da bi formati listi $\mathbf{cc}_{RC}(i)$ i $\mathbf{nr}_{RC}(i)$, $i=1,...,N_{RC}^{CC}$, bili identični. Na taj način, simulaciona lista $\mathbf{sim}_{RC}(i)$ se dobija unijom listi $\mathbf{cc}_{RC}(i)$ i $\mathbf{nr}_{RC}(i)$ iz kojih se izbacuju elementi kod kojih je indikator jednak "", a zatim se sortiraju po vremenu. Struktura simulacione $\mathbf{sim}_{RC}(i)$, $i=1,...,N_{RC}^{CC}$ je:

$$\mathbf{sim}_{RC}(i) = \{ \{ sim_{i,1}, ts_{i,1}, simc_{i,1}, is_{i,1} \}, ..., \{ sim_{i,j}, ts_{i,j}, simc_{i,j}, is_{i,j} \}, ..., \{ sim_{i,n(i)}, ts_{i,n(i)}, simc_{i,n(i)}, is_{i,n(i)} \} \}, \quad (5.3.)$$

gde su:

$sim_{i,j}$ - $Null$ ili redni broj veze na kojoj se dešava promena na fizičkom sloju

$ts_{i,j}$ - trenutak simulacije (zbog sortiranja $ts_{i,1} < ... < ts_{i,j} < ... < ts_{i,n(i)}$)

$simc_{i,j}$ - $Null$ ili novi kapacitet veze

$is_{i,j}$ - indikator zapis $ir_i \in \{ "c", "ls", "r" \}$,

$n(i)$ - indeks poslednjeg elementa u simulacionoj listi za i -tu kišnu ćeliju.

Zbog načina generisanja simulacione liste u trenucima pre $ts_{i,1}$, ali isključujući ovaj trenutak, kao i posle trenutka $ts_{i,n(i)}$ uključujući i ovaj trenutak performanse mreže su identične performansama u odsustvu fedinga. Imajući to u vidu tok simulacije za svaku kišnu ćeliju je sledeći:

1. Izračunaju se putanje usmeravanja paketa i koeficijenti usmeravanja u odsustvu fedinga. Takođe se odrede referentne vrednosti KPI C-OU i C-FCD. Pošto je ovaj korak identičan za svaku kišnu ćeliju dovoljno ga je uraditi samo jednom.
2. Za svaku kišnu ćeliju se formira simulaciona lista **sim_{RC}(i)**. Zatim se:
 - 2.1. Za svaki od element liste **sim_{RC}(i)** u opsegu indeksa od 1 do $n(i)-1$ se na osnovu tipa elementa: promena na fizičkom nivou ili reakcija mreže izvrši odgovarajuća aktivnost promene parametara u mreži: kapaciteta i stanja veza, sadržaja tabela usmeravanja i/ili koeficijenata raspoređivanja paketa.
 - 2.2. Za novonastalo stanjemreže izvrši se određivanje novih kapaciteta dodeljenih saobraćajnim zahtevima prema definicijama novih KPI C-OU i C-FCD, koji imaju opseg važnosti od trenutka $ts_{i,j}$, uključujući i njega do trenutka $ts_{i,j+1}$, isključujući ovaj trenutak.
 - 2.3. Vremenski interval simulacije uticaja i-te kišne ćelije $[ts_{i,1}, ts_{i,n(i)})$ se izdeli na intervale širine jednake vremenu integracije T_0 i u njima se integrale vrednosti KPI C-OU i C-FCD. U slučaju da je poslednji interval kraći od T_0 , dopunjava se rezultatima koje mreža ima u odsustvu fedinga usled kiše.
3. Po završenoj simulaciji uticaja svih kišnih ćelija, računaju se statistike KPI C-OU i C-FCD na godišnjem nivou.

U skladu sa specifikacijom OSPF protokola usmeravanja [RFC 2328], stanje veze se ispituje periodičnim slanjem test paketa na svakih 10s. Izostanak četiri uzastopna test paketa proglašava vezu neraspoloživom i aktivira se mehanizam preračunavanja svih putanja u mreži po Dajkstra algoritmu najkraće putanje, pri čemu je cena svake veze iznosi $10^8/C_o(e)$, $e=1,...,E$ bez obzira na njen trenutni kapacitet. Isto tako, ispravan prijem četiri uzastopna test paketa proglašava vezu raspoloživom i ponovo se pokreće mehanizam preračunavanja svih putanja u vezi. Na taj način za def OSPF se smatra da je vreme reakcije protokola usmeravanja na promenu stanja bilo koje veze u mreži iznosi $T_R=40s$, dok indikator reakcije ima vrednost "r" samo u slučaju kad je njegov uzročnik na fizičkom nivou imao indikaciju promene stanja "ls".

U cilju poboljšanja performansi MRR70GHz u [Peric IEEE CL 10] je predložena primena rezervnih putanja. Svakom saobraćajnom zahtevu se pored glavne putanje dobijene na identičan način kao za slučaj def OSPF algoritma pridružuje zaštitna putanja i saobraćaj se raspoređuje između dva toka preko glavne i rezervne putanje. Jedan od predloženih

algoritama za definisanje zaštitne putanje je NOPHY, u kome se zaštitna putanja generiše tako što se iz mreže ukinu sve veze koje sadrži glavna putanja i zatim algoritmom najkraće putanje sa istim cenama kao za defOSPF, koje iznose $10^8/C_o(e)$, $e=1,...,E$, određuju zaštitne putanje. Na primeru mreže sa Sl. 5.1. za saobraćajni zahtev od čvora N6 ka čvoru N3 glavna putanja je N6-N2-N3 koja se sastoji iz dve veze N6-N2 i N2-N3. Ako se ove dve veze ukinu iz mreže najkraća putanja je: N6-N5-N4-N3 koja predstavlja NOPHY zaštitnu putanju za saobraćajni zahtev N6-N3. Ako zbog ispada veza koje pripadaju glavnoj putanji dođe do preusmeravanja saobraćaja, odnosno promene glavne putanje, rezervna putanja se ne menja bez obzira na stanje veza u njoj. Pri određivanju KPI C-OU između glavne i rezervne putanje bira se putanja koja u tom trenutku ima veći kapacitet odnosno koeficijenti raspoređivanja saobraćaja zadovoljavaju relacije: $b(i,j,1), b(i,j,2) \in \{0,1\}$, $b(i,j,1)=1-b(i,j,2)$, $i=1,...,N_C$, $j=1,...,N_C$, $i \neq j$. Sa druge strane pri određivanju KPI C-FCD koeficijenti raspoređivanja mogu imati proizvoljene vrednosti iz opsega $[0,1]$, u cilju zadovoljenja optimizacionog kriterijuma datog izrazom (3.11).

Treći algoritam preusmeravanja je hipotetički protokol usmeravanja, označen kao ccrOSPF koji reaguje na svaku promenu stanja ili kapaciteta veza u mreži preusmeravanjem po algoritmu najkraće putanje posle jednog koraka rada algoritma koji traje $T_R=1s$. Cene veza odgovaraju trenutnim kapacitetima veze, odnosno: $10^8/c(e,t)$, $e=1,...,E$. Praktično svaka promena na fizičkom sloju bilo "c" bilo "ls" tipa, ima svoju odgovarajuću "r" reakciju.

5.3.2. Rezultati neraspoloživosti saobraćajnih zahteva

Na osnovu rezultata za $C_{i,j}^{OU,T0=1s,p}$ $i=1,...,N_C$, $j=1,...,N_C$, $i \neq j$ urađena je analiza neraspoloživosti svih saobraćajnih zahteva i izračunati su dobici u odnosu na upotrebu samo jedne referentne putanje bez preusmeravanja saobraćaja (Tabela 5.4). Referentna putanja je najkraća putanja u odsustvu fedinga. Definisan je faktor poboljšanja koji predstavlja količnik vremena neraspoloživosti referentne putanje za dati saobraćajni zahtev i vremena neraspoloživosti datog saobraćajnog zahteva dobijenog pri simulaciji odgovarajućih metoda zaštite saobraćaja.

5. IMPLEMENTACIJA NOVOG METODA I NUMERIČKI REZULTATI

Tabela 5.4. Vreme neraspoloživosti po saobraćajnim zahtevima i faktori poboljšanja algoritma preusmeravanja

Saobr. zahtev	Refer. putanja	Vreme neraspoloživosti [%]				Faktor poboljšanja algoritma preusmeravanja		
		Bez preus.	def OSPF	OSPF+ NOPHY	ccr OSPF	def OSPF	OSPF+ NOPHY	ccr OSPF
N1-N2	N1-N2	<i>0.0052</i>	0.0021	0.0007	0.0002	2.5	7.2	24.1
N1-N3	N1-N2-N3	0.0072	0.0031	0.0002	0.0002	2.4	39.4	35.1
N1-N4	N1-N5-N4	0.0116	0.0055	0.0006	0.0004	2.1	18.0	31.5
N1-N5	N1-N5	0.0082	0.0042	0.0017	0.0003	2.0	4.7	28.9
N1-N6	N1-N6	<i>0.0082</i>	0.0034	0.0015	0.0002	2.4	5.5	39.8
N2-N1	N2-N1	0.0052	0.0021	0.0007	0.0002	2.5	7.2	24.1
N2-N3	N2-N3	<i>0.0020</i>	0.0013	0.0007	0.0000	1.5	2.9	642.0
N2-N4	N2-N3-N4	0.0055	0.0030	0.0013	0.0002	1.8	4.2	34.2
N2-N5	N2-N6-N5	0.0100	0.0041	0.0005	0.0001	2.5	18.3	109.0
N2-N6	N2-N6	<i>0.0056</i>	0.0021	0.0002	0.0000	2.7	27.7	590.3
N3-N1	N3-N2-N1	0.0072	0.0031	0.0002	0.0002	2.4	39.4	34.6
N3-N2	N3-N2	0.0020	0.0013	0.0007	0.0000	1.5	2.9	642.0
N3-N4	N3-N4	<i>0.0035</i>	0.0017	0.0006	0.0002	2.1	5.8	21.2
N3-N5	N3-N4-N5	0.0068	0.0033	0.0011	0.0001	2.1	6.3	86.2
N3-N6	N3-N2-N6	0.0068	0.0024	0.0003	0.0000	2.8	24.4	2147.0
N4-N1	N4-N5-N1	0.0116	0.0055	0.0006	0.0004	2.1	18.0	31.5
N4-N2	N4-N3-N2	0.0055	0.0030	0.0013	0.0002	1.8	4.2	34.2
N4-N3	N4-N3	0.0035	0.0017	0.0006	0.0002	2.1	5.8	21.2
N4-N5	N4-N5	<i>0.0035</i>	0.0026	0.0012	0.0002	1.3	3.0	14.3
N4-N6	N4-N5-N6	0.0063	0.0025	0.0002	0.0002	2.5	25.4	38.8
N5-N1	N5-N1	<i>0.0082</i>	0.0042	0.0017	0.0003	2.0	4.7	28.9
N5-N2	N5-N6-N2	0.0100	0.0041	0.0005	0.0001	2.5	18.3	109.0
N5-N3	N5-N6-N3	0.0068	0.0033	0.0011	0.0001	2.1	6.3	86.2
N5-N4	N5-N4	0.0035	0.0026	0.0012	0.0002	1.3	3.0	14.3
N5-N6	N5-N6	<i>0.0044</i>	0.0022	0.0006	0.0001	2.0	7.3	53.4
N6-N1	N6-N1	0.0082	0.0034	0.0015	0.0002	2.4	5.5	39.8
N6-N2	N6-N2	0.0056	0.0021	0.0002	0.0000	2.7	27.7	590.3
N6-N3	N6-N2-N3	0.0068	0.0024	0.0003	0.0000	2.8	24.4	2147.0
N6-N4	N6-N5-N4	0.0063	0.0028	0.0002	0.0002	2.3	25.4	37.4
N6-N5	N6-N5	0.0044	0.0022	0.0006	0.0001	2.0	7.3	53.4

Napomena: *italic* slovima su označena vremena neraspoloživosti referentnih putanja koje sadrže samo jednu radio-relejnu vezu.

Uočava se da sam standardni def OSPF algoritam preusmeravanja ima medijalnu vrednost smanjenja neraspoloživosti sa faktorom poboljšanja koji se kreće u opsegu vrednosti od 1.3 do 2.8, sa medijalnom vrednosti od 2.0. Dodatno uvođenje zaštitne putanje po NOPHY algoritmu povećava faktor poboljšanja procenta neraspoloživog vremena, i on se kreće u granicama od 2.9 do 39.4 sa medijalnom vrednošću 7.3. Brza reakcija posle samo jedne sekunde na svaku promenu u mreži primenjena u hipotetičkom ccr OSPF protokolu donosi značajno smanjenje neraspoloživosti saobraćajnih zahteva. Za ovaj protokol usmeravanja

faktor poboljšanja se kreće u opsegu od 14.3 do 2147, sa medijalnom vrednosti od 53.4. Ekstremne vrednosti faktora poboljšanja su dobijene za saobraćajne zahteve kod kojih su najkraće putanje geografski razdvojene, te nisu istovremeno napadnute fedingom usled kiše, kao što su na primer za čvorove N3 i N6.

Praktično, rezultati dobitka predstavljaju potvrdu prednosti primene PSD u odnosu na CSD u sistemima komunikacija iznad 70GHz. Takođe, ostvarenje neraspoloživosti komunikacije manje od 0.001% vremena nije moguće upotrebom standardnog OSPF protokola usmeravanja, već je neophodno primeniti dodatne tehnike zaštite saobraćaja. U ovom primeru to je moguće postići upotrebom hipotetičkog ccrOSPF protokola usmeravanja, a primena OSPF+NOPHY protokola usmeravanja može ostvariti ovaj rezultat za preko 80% saobraćajnih zahteva.

5.3.3. Rezultati performansi mreže prema KPI C-OU

Pored neraspoloživosti veze, za koju je potvrđeno da se može smanjiti do vrednosti od 0.001% vremena upotrebom adekvatnog protokola usmeravanja paketa, od posebnog značaja je određivanje maksimalnog kapaciteta veze koji može biti dodeljen takvom saobraćajnom zahtevu. Rezultati ove analize prikazani su u Tabeli 5.5 kao novi KPI $C_{i,j}^{OU,T0,0.001\%}$. Takođe su izračunate i statistike na nivou mreže. U cilju boljeg praćenja rezultata vrednosti $C_{i,j}^{OU,T0,0.001\%}$ koje se poklapaju sa $C_{Min}^{OU,T0,0.001\%}$ su označene masnim iskošenim slovima.

Rezultati pokazuju da, bez obzira na uslove slabog opterećenja mreže, neraspoloživost interaktivnih servisa, koji se simuliraju kratikim vremenima integracije T_0 od 1s i 10s, u datoj test mreži je veća od 0.001% u slučaju protokola usmeravanja def OSPF i OSPF sa NOPHY zaštitnim putanjama. Za uspešnu realizaciju ovih servisa sa ciljnim procentom manjim od 0.001% vremena neophodna je realizacija protokola usmeravanja koji reaguje preusmeravanjem paketa na svaku promenu u mreži. Sa druge strane prenos datoteka, simuliran vremenom integracije od $T_0=60s$ se za sva tri protokola usmeravanja se na datoj test mreži može ostvariti u ciljanom procentu od 0.001% vremena. Medijalna vrednost na nivou mreže $C_{Median}^{OU,T0,0.001\%}$ pokazuje da su performanse u pogledu ostvarivog protoka za ccrOSPF protokol usmeravanja oko tri puta bolje u odnosu na OSPF sa NOPHY zaštitnim putanjama i približno osam puta bolje u odnosu na def OSPF.

5. IMPLEMENTACIJA NOVOG METODA I NUMERIČKI REZULTATI

Tabela 5.5. Kriterijum maksimalnog protoka prevaziđen u 0.001% vremena $C_{i,j}^{OU,T0,0.001\%}$

T0	1			10			60		
Protokol	def OSPF	OSPF+ NOPHY	ccr OSPF	def OSPF	OSPF+ NOPHY	ccr OSPF	def OSPF	OSPF+ NOPHY	ccr OSPF
N1-N2	<i>0</i>	10	<i>10</i>	<i>0</i>	10	<i>10</i>	8	14	63
N1-N3	<i>0</i>	10	<i>10</i>	<i>0</i>	10	<i>10</i>	10	42	49
N1- N4	<i>0</i>	10	<i>10</i>	<i>0</i>	10	<i>10</i>	<i>4</i>	26	<i>28</i>
N1- N5	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>10</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>10</i>	5	<i>8</i>	63
N1- N6	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>10</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>10</i>	6	14	90
N2- N1	<i>0</i>	10	<i>10</i>	<i>0</i>	10	<i>10</i>	8	14	63
N2- N3	<i>0</i>	10	<i>10</i>	2	10	24	10	17	64
N2- N4	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>10</i>	<i>0</i>	3	<i>10</i>	5	10	31
N2- N5	<i>0</i>	10	<i>10</i>	<i>0</i>	10	55	8	30	99
N2- N6	<i>0</i>	10	100	<i>0</i>	10	100	10	55	184
N3- N1	<i>0</i>	10	<i>10</i>	<i>0</i>	10	<i>10</i>	7	45	49
N3- N2	<i>0</i>	10	<i>10</i>	2	10	24	10	17	64
N3- N4	<i>0</i>	10	<i>10</i>	<i>0</i>	10	<i>10</i>	10	20	30
N3- N5	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>10</i>	<i>0</i>	5	33	5	10	90
N3- N6	<i>0</i>	10	100	<i>0</i>	10	91	10	35	100
N4-N1	<i>0</i>	10	<i>10</i>	<i>0</i>	10	<i>10</i>	<i>4</i>	26	<i>28</i>
N4-N2	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>10</i>	<i>0</i>	3	<i>10</i>	5	10	31
N4-N3	<i>0</i>	10	<i>10</i>	<i>0</i>	10	<i>10</i>	10	20	30
N4-N5	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>10</i>	<i>0</i>	4	<i>10</i>	5	10	30
N4-N6	<i>0</i>	10	<i>10</i>	<i>0</i>	10	<i>10</i>	9	30	34
N5-N1	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>10</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>10</i>	5	<i>8</i>	63
N5-N2	<i>0</i>	10	<i>10</i>	<i>0</i>	10	55	8	30	99
N5-N3	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>10</i>	<i>0</i>	5	33	5	10	90
N5-N4	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>10</i>	<i>0</i>	4	<i>10</i>	5	10	30
N5-N6	<i>0</i>	10	100	<i>0</i>	10	100	10	29	99
N6-N1	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>10</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>10</i>	6	14	90
N6-N2	<i>0</i>	10	100	<i>0</i>	10	100	10	55	184
N6-N3	<i>0</i>	10	100	<i>0</i>	10	91	10	35	100
N6-N4	<i>0</i>	10	<i>10</i>	<i>0</i>	10	<i>10</i>	6	30	34
N6-N5	<i>0</i>	10	100	<i>0</i>	10	100	10	29	99
$C_{Min}^{OU,T0,0.001\%}$	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>10</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>10</i>	<i>4</i>	<i>8</i>	<i>28</i>
$C_{Median}^{OU,T0,0.001\%}$	0	10	10	0	10	10	8	20	63
$C_{Max}^{OU,T0,0.001\%}$	0	10	100	2	10	100	10	55	184

Napomena: *italics*lovima su označeni kapaciteti pojedinačnih saobraćajnih zahteva koji imaju vrednost jednaku $C_{Min}^{OU,T0,0.001\%}$ za dato T0 i dati protokol

5. IMPLEMENTACIJA NOVOG METODA I NUMERIČKI REZULTATI

Tabela 5.6. Kriterijum maksimalnog protoka prevaziđen u 0.005% vremena $C_{i,j}^{OU,T0,0.005\%}$

T0	1			10			60		
Rutiranje	def OSPF	OSPF+ NOPHY	ccr OSPF	def OSPF	OSPF+ NOPHY	ccr OSPF	def OSPF	OSPF+ NOPHY	ccr OSPF
N1-2	10	100	100	10	100	100	28	100	387
N1-3	10	100	100	10	100	100	12	296	292
N1-4	0	100	100	5	100	100	10	297	296
N1-5	10	10	100	10	10	100	10	87	405
N1-6	10	10	100	10	11	100	18	79	478
N2-1	10	100	100	10	100	100	28	100	387
N2-3	10	100	100	10	100	100	46	100	313
N2-4	10	10	100	10	10	100	10	55	306
N2-5	10	100	100	10	100	100	10	265	495
N2-6	10	100	1000	10	100	910	22	371	690
N3-1	10	100	100	10	100	100	10	296	284
N3-2	10	100	100	10	100	100	46	100	313
N3-4	10	100	100	10	100	100	10	100	211
N3-5	10	10	100	10	10	100	10	51	350
N3-6	10	100	100	10	100	100	10	145	465
N4-1	0	100	100	5	100	100	10	297	296
N4-2	10	10	100	10	10	100	10	55	306
N4-3	10	100	100	10	100	100	10	100	211
N4-5	10	10	100	10	10	100	24	59	322
N4-6	10	100	100	10	100	100	25	359	408
N5-1	10	10	100	10	10	100	10	87	405
N5-2	10	100	100	10	100	100	10	265	495
N5-3	10	10	100	10	10	100	10	51	350
N5-4	10	10	100	10	10	100	24	59	322
N5-6	10	100	100	10	100	280	31	193	585
N6-1	10	10	100	10	11	100	18	79	478
N6-2	10	100	1000	10	100	910	22	371	690
N6-3	10	100	100	10	100	100	10	145	465
N6-4	10	100	100	10	100	100	12	359	407
N6-5	10	100	100	10	100	280	31	193	585
$C_{Min}^{OU,T0,0.005\%}$	0	10	100	5	10	100	10	51	211
$C_{Median}^{OU,T0,0.005\%}$	10	100	100	10	100	100	11	100	387
$C_{Max}^{OU,T0,0.005\%}$	10	100	1000	10	100	910	46	371	690

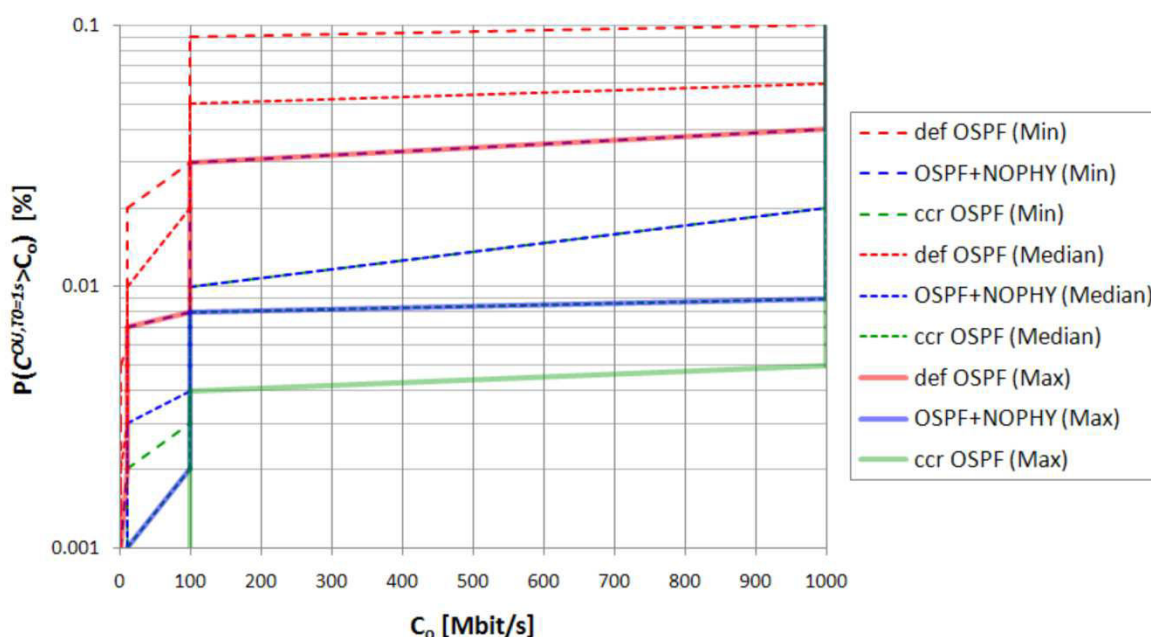
Napomena: *italics*lovima su označeni kapaciteti pojedinačnih saobraćajnih zahteva koji imaju vrednost jednaku $C_{Min}^{OU,T0,0.005\%}$ za dato T0 i dati protokol

U slučaju da je ciljna vrednost neraspoloživosti servisa do 0.005% vremena, što znači da neraspoloživost servisa iznosi oko 30 minuta godišnje, za većinu saobraćajnih zahteva moguće je ostvariti sve tipove servisa (Tabela 5.6). U datoj test mreži, u uslovima slabog opterećenja, primena ccr OSPF protokola usmeravanja značajno eliminiše negativan uticaj

5. IMPLEMENTACIJA NOVOG METODA I NUMERIČKI REZULTATI

kiše za servise prenosa datoteka, jer medijalna vrednost ostvarivog protoka iznosi 387Mbit/s. Sa druge strane degradacija performansi izazvana kišom je primetna za druga dva protokola usmeravanja.

Da bi se odredio procenat vremena u kome prosečan ne oseća uticaj kiše posmatraju se kumulativne funkcije KPI C-OU na nivou mreže (Sl. 5.7., 5.8 i 5.9). Uočava se da povećanje vremena integracije, čini CDF krive manje strmim i pravi veću razliku između različitih protokola usmeravanja.



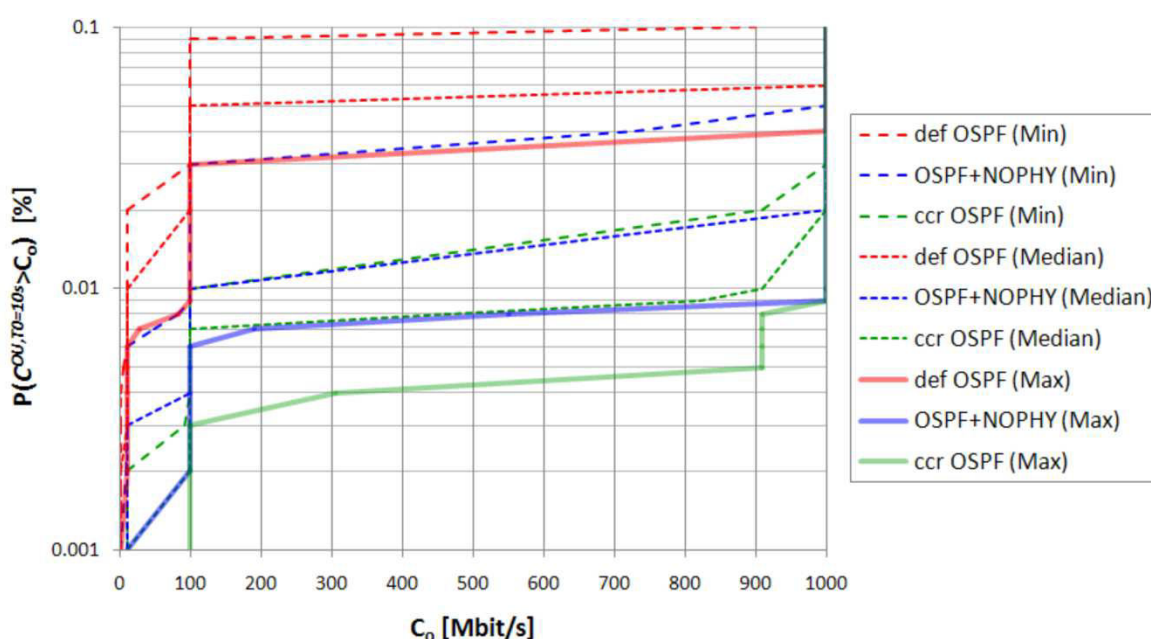
Sl.5.7. Rezultati simulacije KPI C-OU za vreme integracije $T_0=1s$ za protokole usmeravanja *defOSPF*, *OSPF* sa *NOPHY* zaštitnim putanjama i *ccrOSPF*

U slučaju visoko interaktivnih servisa kao što su VoIP ili videokonferencije (Sl. 5.7) primena standardnog def OSPF protokola usmeravanja, daje ne prihvatljive rezultate u 0.02% vremena, kada je medijalni protok ispod 100Mbit/s. Primena OSPF+NOPHY protokola usmeravanja ovu granicu spušta na 0.004% vremena, dok ccr OSPF daje još bolje rezultate i granica nemogućnosti realizacije visoko interaktivnih servisa se spušta na 0.002% vremena. Interesantno je uočiti da se iznad ovog procenta vremena, posmatrano po svim saobraćajnim zahtevima OSPF+NOPHY omogućava minimalni kapacitet veze bolji od najboljeg kapaciteta veze koji omogućava def OSPF. Slična gradacija je i između ccr OSPF i OSPF+NOPHY algoritama. Zbog toga po pitanju realizacije interaktivnih servisa u MRR70GHz postoje

5. IMPLEMENTACIJA NOVOG METODA I NUMERIČKI REZULTATI

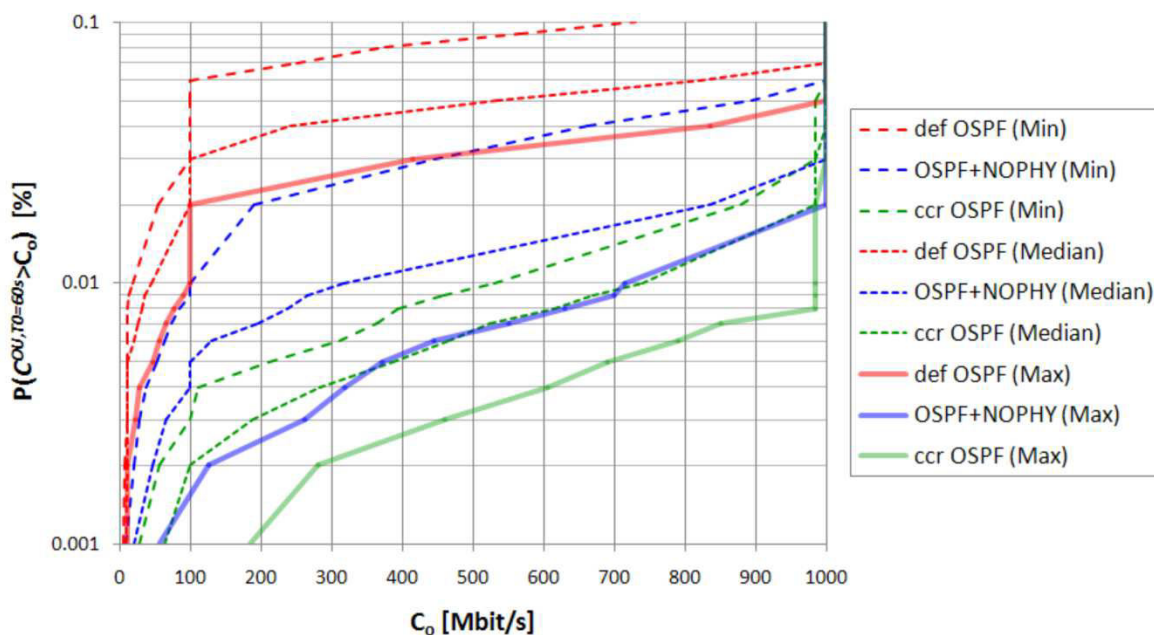
značajne mogućnosti poboljšanja u odnosu na standardne protokole usmeravanja paketa. Procenat vremena pri kome po KPI C-OU se oseća uticaj kiše za def OSPF iznosi čak 0.1% vremena, dok za OSPF + NOPHY iznosi 0.03% vremena, a za ccr OSPF iznosi 0.007% vremena.

Za manje interaktivne servise kao što su audio i video streaming (Sl 5.8), značajnije poboljšanje u odnosu na visoko interaktivne servise u pogledu raspoloživog kapaciteta je primetno za ccr OSPF, dok druga dva protokola usmeravanja imaju slične performanse.



Sl.5.8. Rezultati simulacije KPI C-OU za vreme integracije $T_0=10s$ za protokole usmeravanja defOSPF, OSPF sa NOPHY zaštitnim putanjama i ccrOSPF

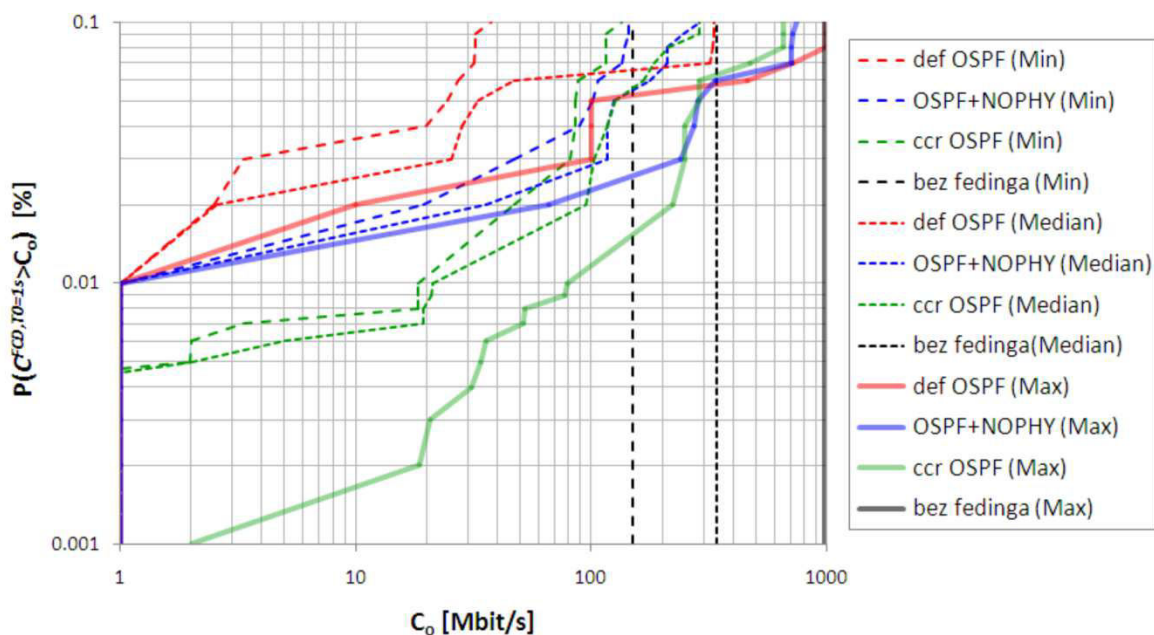
U slučaju prenosa datoteka, kao neinteraktivnog servisa, očigledna su poboljšanja za sva tri protokola usmeravanja, pri čemu su najizraženija za ccr OSPF (Sl. 5.9).



Sl.5.9. Rezultati simulacije KPI C-OU za vreme integracije $T_0=60s$ za protokole usmeravanja defOSPF, OSPF sa NOPHY zaštitnim putanjama i ccrOSPF

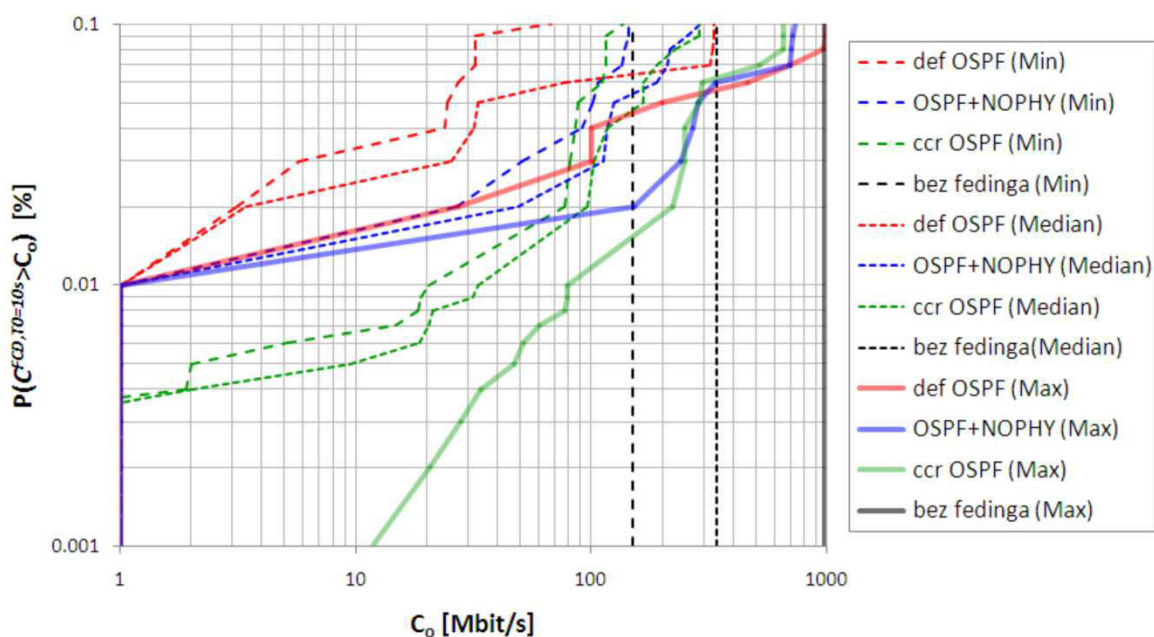
5.3.4. Rezultati performansi mreže prema KPI C-FCD

Prisustvo većeg broja korisnika u mreži istovremeno sa dejstvom kišnih ćelija velikog intenziteta značajno degradira performanse mreže što pokazuju rezultati KPI C-FCD (Sl. 5.10, 5.11 i 5.12). Za razliku od C-OU kriterijuma, zbog metoda dodela resursa mreže pojedinim saobraćajnim zahtevima tako da se suma logaritama dodeljenih kapaciteta maksimizuje, osa kapaciteta je na ovim dijagramima prikazana u logaritamskoj razmeri. Kao što je u trećem poglavlju pri definiciji KPI C-FCD napomenuto, posmatraju se samo statističke vrednosti računate po svim saobraćajnim zahtevima, a ne vrednosti za konkretan saobraćajni zahtev. Kao indikator kvaliteta cele mreže posmatraju se vremenski trenuci u kojima će performanse mreže biti za manje od specificiranog faktora degradacije (engl. *degradation factor* - DF) lošije u odnosu na performanse mreže u odsustvu kiše. Kao glavni parametar se posmatra medijalna vrednost, dok minimalna i maksimalna vrednost imaju kontrolnu svrhu. U ovom test primeru, za DF je usvojena vrednost 10, odnosno dodeljeni kapaciteti pri dejstvu kiše iznose manje od 10% dodeljenih kapaciteta u odsustvu kiše.



Sl.5.10. Rezultati simulacije KPI C-FCD za vreme integracije $T_0=1s$ za protokole usmeravanja *defOSPF*, *OSPF* sa *NOPHY* zaštitnim putanjama i *ccrOSPF*

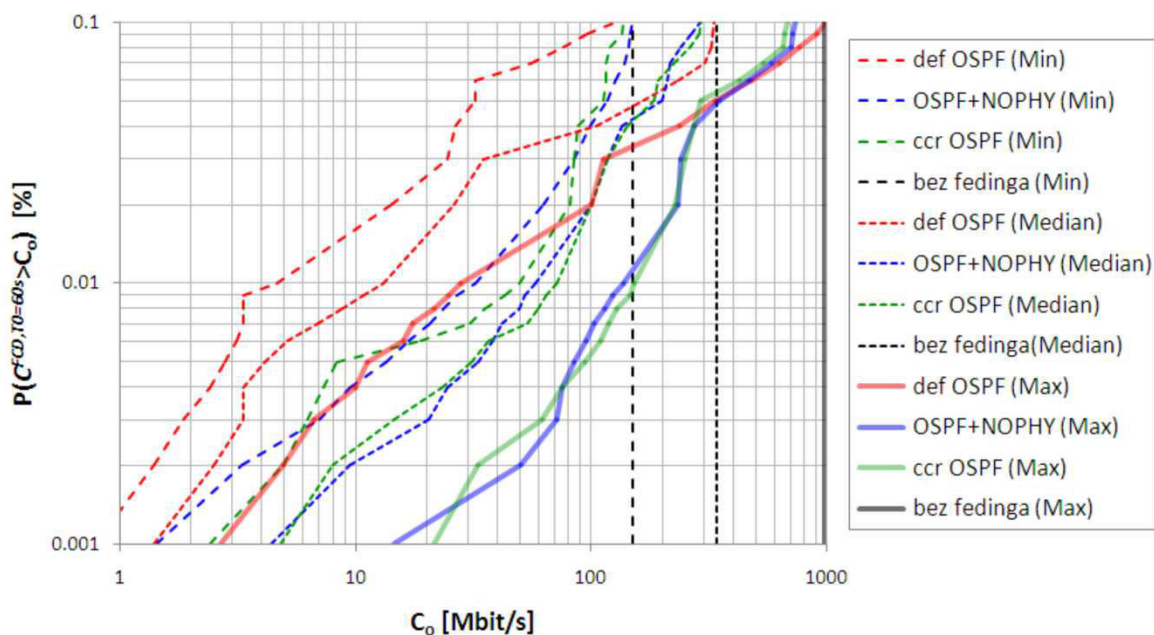
Primena standardnog defOSPF protokola usmeravanja čini mogućim realizaciju visoko interaktivnih servisa ($T_0=1s$) medijalna vrednost KPI C-FCD iznosi manje od 10% vrednosti u odsustvu fedinga u 0.04% vremena. U slučaju OSPF+NOPHY protokola usmeravanja procenat iznosi 0.02% vremena, dok u slučaju ccr OSPF u 0.012% vremena. Za protokole defOSPF i OSPF+NOPHY rezultati su slični i za minimalne vrednosti C-FCD. Protokol ccr OSPF ima značajno bolje performanse u odnosu na druga dva protokola jer CDF kriva medijalnih vrednosti se počinje povećavati u pogledu dodeljenih kapaciteta već od 0.0047% vremena, dok se kod druga dva protokola usmeravanja to dešava posle 0.01% vremena.



Sl.5.11. Rezultati simulacije KPI C-FCD za vreme integracije $T_0=10s$ za protokole usmeravanja *defOSPF*, *OSPF* sa *NOPHY* zaštitnim putanjama i *ccrOSPF*

Smanjenje nivoa interakcije servisa na $T_0=10s$, ne doprinosi značajno poboljšanju performansi *defOSPF* i *OSPF+NOPHY* protokola usmeravanja u pogledu mogućnosti dodele kapaciteta. Međutim, za *ccrOSPF* protokol usmeravanja, povećanje dodeljenog kapaciteta je jasno uočljivo već u preko 0.0036% vremena, što znači da se katastrofalna degradacija kvaliteta ovih servisa događa u manje od 19 minuta godišnje.

Slično kao što pokazuje C-OU parametar i C-FCD parametar pokazuje da je neinteraktivni prenos datoteka ($T_0=60s$) uz primenu bilo kog od tri posmatrana protokola usmeravanja nije moguć u samo 0.001% slučajeva (Sl. 5.12), odnosno da je zaštita saobraćaja na mrežnom nivou vrlo efikasna. Za ovaj servis, kad u mreži postoji veći broj korisnika mogućnost deljenja saobraćaja po više tokova čini da se performanse *OSPF+NOPHY* protokola usmeravanja praktično izjednačavaju sa performansama *ccr OSPF* protokola usmeravanja. Sa druge strane performanse *def OSPF* su značajno lošije.



Sl.5.12. Rezultati simulacije KPI C-FCD za vreme integracije $T_0=60s$ za protokole usmeravanja *defOSPF*, *OSPF* sa *NOPHY* zaštitnim putanjama i *ccrOSPF*

Analiza performansi za $T_0=10s$ i $T_0=60s$ pokazuje da u pogledu maksimalno dodeljenog kapaciteta saobraćajnom zahtevu *def OSPF* protokol, jedini uspeva da postigne rezultat u odsustvu fedinga u manje od 0.1% vremena. Sa druge strane performanse minimalno dodeljenog protoka su za bilo koju vrednost verovatnoće u opsegu od interesa od 0.001% do 0.1% vremena lošije ili čak značajno lošije u odnosu na druga dva protokola usmeravanja. Ovaj rezultat ukazuje da *defOSPF* dozvoljava manje efikasno proporcionalno fer raspodelu resursa mreže, te za poređenje rezultata protokola usmeravanja uvek treba posmatrati i minimalnu i medijalnu i maksimalnu vrednost.

6. DISKUSIJA

Simulacija na test mreži pokazala je efikasnost predloženog metoda za analizu performansi MRR70GHz na godišnjem nivou. Kako bi rezultati simulacije što vernije prikazivali sliku uticaja lokalnih hidrometeoroloških karakteristika područja na kome je instalirana MRR70GHz na konkretnu primenu mreže potrebno je da posebna pažnja bude posvećena definisanju ulaznih parametara.

U okviru rekapitulacije rezultata potvrdiće se da predloženi model uspešno detektuje razlike u performansama u funkciji primenjenog metoda preraspodeljivanja i preusmeravanja saobraćaja i vrste servisa modelovanog različitim vremenima integracije pri proračunu KPI C-OU i C-FCD. Takođe će se analizirati mogućnosti da se primenom ovog modela odrede kritične granice parametara kišnih ćelija i procenta vremena u kome se one javljaju u kojima je moguće da data MRR70GHz uspešno ostvaruje željeni servis. Na taj način, značajno se redukuje broj slučajeva koje treba analizirati složenijim simulacijama na nivou paketa.

Na osnovu ovih analiza predložiće se pravci daljeg istraživanja.

6.1. Definisane ulaznih parametara

Ulazni parametri su podeljeni u dve grupe: hidro-meteorološki parametri za simulaciju karakteristika lokalnog geografskog područja u pogledu kiše i saobraćajni parametri za prilagođavanje saobraćajne matrice konkretnoj primeni date MRR70GHz. Parametri samih MRR70GHz se definišu direktno na osnovu karakteristika instalirane opreme i geografskih lokacija čvorišta.

6.1.1. Hidro-meteorološki parametri

U poglavlju 5 prikazana je analiza test mreže kod kojih su ulazni parametri kumulativne funkcije raspodele intenziteta kiše i broja kišnih događaja definisani na osnovu karakterizacije geografskog područja prema ITU-R klimatskim zonama [ITU-R P.837-1] raspodela intenziteta brzine vetra preuzeta je analitičkim opisivanjem raspodela iz citirane literature, dok je

pretpostavljena uniformna raspodela azimuta brzine vetra. Pokazano je da predloženi algoritam simulacije verno reprodukuje pretpostavljene raspodele. Uspešna reprodukcija pretpostavljenih raspodela rezultuje ponavljanju rezultata poznatog iz literature da kišne ćelije većeg intenziteta po pravilu imaju manje karakteristično rastojanje. Za održanje ovog trenda u predloženom modelu najznačajnije je usvajanje odgovarajuće raspodele brzine vetra u prisustvu kiše, kao i korelisanost intenziteta brzine vetra i intenziteta kiše. Podaci o količini padavina sa rezolucijom do 6h, kao i brzini vetra na visinama koje odgovaraju kišnim oblacima, te su korelisani sa kretanjem kišnih masa (pritisku od 700hPa, do 850hPa) [Emilijani-03] mogu se dobiti iz otvorenih hidrometeoroloških baza podataka ERA-15 [ERA-15] i ERA-40 [ERA-40]. Analizom ovih podataka se mogu dobiti podaci vezani za korelisanost vetra i kiše za uža geografska područja. Metodologija uklapanja eksperimentalnih rezultata u pretpostavljene raspodele detaljnije je prikazana u [Siti 09]. Po pitanju kumulativne funkcije raspodele intenziteta kiše iz baza podataka ERA-15 i ERA-40 se primenom tehnika interpolacije opisanim u [Capsoni TAP-09][Emiliani-09] mogu dobiti podaci koji bolje reprezentuju lokalne karakteristike u odnosu na ITU-R klimatske zone. Pošto su za analizu propagacije od interesa podaci o intenzitetu kiše merenog sa vremenom integracije od 1min ili manje (na primer 10s ili 1s), a u meteorološkim bazama podataka se nalaze podaci sa značajno dužim vremenima integracije, razvijene su metode za konverziju vremena integracije CDF-a koje su prikazane u [Capsoni TAP-09][Emiliani-09].

Po pitanju verodostojnosti ulaznih parametara modela da verno opisuje lokalno područje najkritičnije je određivanje favorizovanih azimuta vektora kretanja kišnih masa, koje nastaju zbog pojava tzv. ruža vetrova i izuzetno su lokalnog karaktera [Siti 09], te se precizni podaci mogu dobiti prvenstveno od lokalnih hidrometeoroloških institucija. U njihovom nedostatku za analizu performansi MRR70GHz može se pretpostaviti uniformna raspodela kao što je to učinjeno u poglavlju 5 na primeru test mreže.

6.1.2. Parametri saobraćajne matrice

U modelu, opisanom u poglavlju 3, kao i u analizi test mreže u poglavlju 5, pretpostavljeno je da svaki čvor želi da komunicira sa svakim te su u saobraćajnoj matrici $\mathbf{H}$ svi elementi koji nisu na glavnoj dijagonali različiti od nule: $h(i,j) \neq 0$, za $i \neq j$, $i=1,...,N_C$, $j=1,...,N_C$. U praktičnim primenama MRR70GHz za realizaciju pristupnih mreža, često se nalaze slučajevi kad sva čvorišta treba da komuniciraju samo sa ivičnim usmerivačima na

kojima se nalazi veza sa glavnim prenosnim sistemom (engl. *backbone*) [Newman 04]. Ovakav slučaj se modeluje modifikovanjem saobraćajne matrice $\mathbf{H}$ tako što su nenulti elementi samo saobraćajni zahtevi između čvorova ivičnih usmerivača.

Opisana situacija realizacije tzv. bekhol mreže (engl. *backhaul network*) se javlja u pristupnim mrežama Internet provajdera za kućne korisnike u visoko urbanim sredinama. Slična situacija po pitanju strukture mreže javlja se i generalno u pristupnim mrežama bilo fiksnim, bilo mobilnim zaključno sa trećom generacijom (UMTS, CDMA). Međutim, zbog velikog kapaciteta koji nude MRR70GHz njihova ciljna primena je za realizaciju glavnih prenosnih sistema u datim telekomunikacionim mrežama, te saobraćajna matrica ima oblik kao što je pretpostavljeno u modelu.

Drugi specifičan slučaj za primenu MRR70GHz je u sistemima mobilnih komunikacija sa LTE i LTE-A pristupnom tehnologijom, gde pored pristupa backbone-u, geografski bliske bazne stanice, u cilju efikasnijeg preuzimanja korisnika (engl. *handover*) međusobno razmenjuju podatke preko X2 interfejsa [Dahlman 11]. Zbog velikih brzina koje dostižu više stotina Mbit/s ka krajnjim korisnicima u ovakvim mrežama RR70GHz se koriste za direktno povezivanje baznih stanica. Ovaj slučaj se modeluje tako što u saobraćajnoj matrici $\mathbf{H}$ nenulti elementi postaju saobraćajni zahtevi za komunikaciju ka ivičnim usmerivačima i za komunikaciju ka usmerivačima u susednim baznim stanicama.

Povećanje broja elemenata koji su uvek jednaki nuli u matrici saobraćajnih zahteva $\mathbf{H}$ situacija pojednostavljuje analizu i skraćuje vreme simulacije, što je posebno izraženo pri proračunu KPI C-FCD. Zahvaljujući tome, primenom predloženog modela moguća je u pogledu potrebnih računarskih resursa efikasna analiza složenih i gustih MRR70GHz dokle god je ispunjen hidrometeorološki uslov male geografske površine do oko 10x10km.

6.2. Rekapitulacija rezultata

U primeru analize performansi jedne MRR70GHz, koja je instalirana na teritoriji površine oko 6x6km, pokazano je da je za adekvatnu simulaciju padavina u opsegu verovatnoća od interesa od 0.001% do 0.1% vremena potrebno generisati 768 kišnih ćelija. Analiza na fizičkom sloju pokazala je da ukupno 297 kišnih ćelija izaziva promene na fizičkom sloju na godišnjem nivou u ukupnom trajanju od 87481s (oko 24.3h).

Primenom tehnika simulacije na nivou paketa upotrebom softvera poput OPNET-a i NS2 za prihvatljivo vreme ne bi se moglo doći do rezultata performansi mreže. To je posebno

otežano činjenicom da bi za ovakve simulacije bilo neophodno pretpostaviti vrstu saobraćaja koju generišu svi korisnici. Definicijom uprošćenog matematičkog modela i novih KPI C-OU i C-FCD ovaj problem je prevaziđen te je za prihvatljivo vreme moguće steći uvid u performanse mreže kako u uslovima slabog opterećenja, tako i u uslovima zagušenja. Na osnovu dobijenih rezultata formira se granica procenata vremena:

- a. u kojima je moguće ostvariti određene servise, i
- b. u kojima ne dolazi do značajne degradacije performansi mreže u odnosu na period kad nema uticaja fedinga usled kiše

Granice za procenat vremena u kojima je moguće ostvariti odgovarajuće servise dobijaju se analizom KPI C-OU na nivou individualnih saobraćajnih zahteva, a na dijagramima kumulativnih funkcija raspodele ovog KPI stiče se uvid u ponašanje cele mreže. Dodatno, ovaj KPI C-OU se pri malim vremenima integracije reda veličine 1s, može koristiti za analizu raspoloživosti komunikacije u mreži

Na primeru test mreže, koja treba da bude instalirana u oblasti gde intenzitet kiše prevaziđen u 0.01% vremena R_{001} iznosi 30mm/h, na osnovu izračunatih CDF KPI C-OU pokazano je da primena IP tehnologije, čak i sa standardnim OSPF protokolom usmeravana višestruko povećava raspoloživost komunikacije između dva čvora u mreži u odnosu na fiksnu putanju. Performanse mreže u pogledu raspoloživosti servisa se dalje popravljaju upotrebom zaštitnih putanja po NOPHY algoritmu.

U pogledu mogućnosti realizacije različitih servisa, sva tri analizirana protokola usmeravanja omogućavaju prenos datoteka uz raspoloživost servisa 99.999% vremena. Ostvarenje ovako visokog stepena raspoloživosti pri realizaciji visokointeraktivnih servisa, zahteva primenu protokola usmeravanja koji bi reagovali na svaku promenu kapaciteta veza u mreži. Ovakvi protokoli za sada nisu implementirani i predstavljaju pravac daljeg istraživanja i razvoja.

Performanse MRR70GHz koja opslužuje veći broj korisnika analizirane su posmatranjem degradacije KPI C-FCD uzrokovane kišom u odnosu na vrednosti KPI C-FCD u odsustvu usled kiše. Analiza CDF KPI C-FCD na test mreži je pokazala da u opterećenoj mreži za realizaciju interaktivnih servisa standardni def OSPF protokol usmeravanja ostvaruje 10% performansi mreže u odsustvu fedinga u oko 99.96% vremena, a upotreba NOPHY zaštitnih putanja poboljšava rezultat na 99.98% vremena. Za ova dva protokola usmeravanja razlike u rezultatu za vremena integracije 1s i 10s su neznatne. Sa druge strane hipotetički ccr

OSPF protokol usmeravanja omogućava realizaciju visoko interaktivnih servisa u 99.996% vremena.

Sva tri protokola usmeravanja omogućavaju prenos datoteka i u opterećenoj mreži, naravno proporcionalno degradiran u odnosu na slučaj jednog korisnika u mreži. Rezultati pokazuju da za realizaciju ovog tipa servisa u opterećenoj mreži praktično ne postoji razlika između primene zaštitnih putanja po NOPHY algoritmu i preusmeravanja saobraćaja na svaku promenu kapaciteta u mreži simuliranu hipotetičkim ccr OSPF protokolom usmeravanja. Ovaj rezultat pokazuje da se upotrebom NOPHY zaštitnih putanja sa odgovarajućim algoritmom za izbor koeficijenata raspodeljivanja saobraćaja između glavne i rezervne putanje, za ovaj tip servisa možezameniti potrebu za korekcijama tabela usmeravanja koja je uvek praćenja negativnim efektima gubitaka paketa usled konačne brzine konvergencije mreže. Sa druge strane, za realizaciju visoko interaktivnih servisa to nije slučaj, te drugi načini izbora zaštitnih putanja predstavljaju predmet daljeg istraživanja.

6.3. Pravci daljeg istraživanja

Jedan od najznačajnijih problema pri analizi performansi mreže na godišnjem nivou je količina podataka koju je potrebno obraditi. Dati uprošćeni matematički model omogućava određivanje granice parametara kišnih ćelija do kojih ima praktičnog značaja primeniti složenije metode analize performansi mreže kao što su primena softverskih paketa poput NS2 [NS2] i OPNET [OPNET]. Pored upotrebe specijalizovanog softvera, ovakva analiza se može sprovesti i u virtualnom okruženju gde se odgovarajućim skriptama modifikuju kapaciteti veza između virtualnih mašina koje simuliraju rad usmerivača [VMware]. Formiranje ovakvog test okruženja predstavlja jedan od glavnih pravaca daljeg istraživanja koji kao rezultat treba da da bolji uvid u performanse određenih servisa koje može da ostvari MRR70GHz. Na osnovu analize test mreže novim KPI C-OU i C-FCD pokazano je da za def OSPF i OSPF+NOPHY algoritme, za visoko interaktivne servise mreža ima neprihvatljivo loše performanse u 0.01% vremena, dok upotreba ccr OSPF protokola usmeravanja spušta ovu granicu na 0.0036% vremena. Ove vrednosti odgovaraju intenzitetu kiše od 30mm/h, odnosno 45mm/h, na osnovu čega se iz listi svih kišnih ćelija mogu uzeti reprezentativne kišne ćelije koje na VRG maksimalno generišu ove vrednosti intenziteta kiše i za njih uraditi analiza na nivou paketa za konkretne aplikacije od interesa. Takođe, kao povratna sprega ovih

novih istraživanja očekuju se predlozi za definisanje novih KPI koji verodostojnije opisuju saobraćaj korisnika u mreži ili nove servise koje MRR70GHz treba da opsluži.

Sama primena KPI C-OU i C-FCD nema ograničenje samo na MRR70GHz, već se može primeniti i na mreže realizovane na nižim frekvencijskim opsezima ili delimično realizovane sistemima komunikacija po optičkim kablovima. Ovakve mreže mogu zauzimati šire geografsko područje od onoga koje pokriva novi predloženi dinamički model slabljenja usled kiše na bazi pomerajućih kišnih ćelija fiksnih parametara. Da bi se ovaj problem prevazišao drugi pravac istraživanja je u uslozňjavanju modela kiše koji bi bio dopunjen i procesima rađanja i isčezavanja kišnih ćelija, kao i mogućnošću istovremenog dejstva dve ili više kišnih ćelija na mreži uz zadržavanje pretpostavljenih parametara brzine i smera kretanja kišnih masa. Realizacija ovog modela može ići u dva pravca: uvođenja dodatnog težinskog faktora rađanja i isčezavanja i/ili opisivanja kišnih ćelija konturama umesto pretpostavljenim analitičkim izrazima.

Rezultati performansi OSPF+NOPHY protokola usmeravanja ukazuju da primena zaštitnih putanja predstavlja za određene vrste servisa dobru alternativu metodima zaštite saobraćaja na bazi preusmeravanja, te je treći pravac istraživanja testiranje postojećih i razvoj novih metoda zaštite saobraćaja na godišnjem nivou. U [Peric IEEE CL 10] predložen je PHY metod za generisanje zaštitnih putanja koji generiše zaštitne putanje na osnovu mogućeg slabljenja koji izaziva pretpostavljeni oblik kišne ćelije, i zbog toga je pogodan za mreže u kojima su fiksirane dimenzije antena, te kraće veze imaju veću raspoloživost u odnosu na duže. Sa druge strane u [Jabbar 08] su predloženi novi proaktivni metodi preusmeravanja saobraćaja. Oba metoda zaštite u citiranoj literaturi su testirani samo za specifične vrste kišnih ćelija, koje nisu reprezent godišnje raspodele kiše, te bi njihove performanse trebalo dodatno istražiti i u skladu sa rezultatima eventualno predložiti modifikacije. Analiza kiše kao meteorološke pojave, što je detaljno opisano u poglavlju 2, ukazuje da je vektor brzine pomeranja kišnih masa konstantan po azimutu i intenzitetu u dužem vremenskom periodu što se može koristiti za definisanje novih mehanizama zaštite saobraćaja kako na bazi preusmeravanja modifikovanjem cena veza na osnovu predikcije slabljenja, tako i primenom zaštitnih putanja definisanih na drugi način.

7. ZAKLJUČAK

Pri analizi performansi radio ralejnih-veza realizovanih na frekvencijskim opsezima iznad 70GHz (RR70GHz) koje se koriste za povezivanje usmerivača u računarskim mrežama i time formiraju računarsku mrežu (MRR70GHz) potrebno je analizirati uticaj kiše kao dominantnog uzročnika pojave slabljenja na RR70GHz. Da bi se uticaj kiše kompenzovao, RR70GHz poseduje mehanizam koji primenom tehnika adaptivnog protoka, modulacije i zaštitnog kodovanja omogućava kompromis između snage primljenog signala i kapaciteta veze. Na taj način uticaj kiše može se modelovati kao kapacitet veze u funkciji slabljenja usled kiše. Nulti kapacitet odgovara prekidu radio-relejne veze. Računarska mreža na ove pojave na fizičkom sloju reaguje posle određenog vremena reakcije preusmeravanjem saobraćaja ili preraspodeljivanjem saobraćaja između više alternativnih putanja. Trajanje vremena reakcije iznosi tipično od jedne sekunde do nekoliko desetina sekundi. Ovi mehanizmi zaštite saobraćaja, pored pozitivnog efekta očuvanja raspoloživosti veze s kraja na kraj, imaju negativan efekat dodatnog optrećivanja veza koje nisu napadnute fedingom usled kiše, te mogu da prime preusmeren saobraćaj.

Do sada publikovani metodi analize performansi radio-relejnih veza baziraju na određivanju procenta vremena u kome veza ima odgovarajući kapacitet, koje ne opisuje efekat da u zavisnosti od vrste servisa postoji određen stepen dinamičke adaptacije protokola viših slojeva komunikacije. To za posledicu ima da proračun performansi primenom standardnih analiza ne pružaja dovoljan uvid u iskustvo korisnika RR70GHz, odnosno MRR70GHz. Da bi se ovaj problem prevazišao u ovoj disertaciji je predložen novi metod analize performansi RR70GHz i MRR70GHz na bazi ključnih indikatora performansi. Kao pobuda na fizičkom sloju posmatra se dvodimenzionalna raspodela kiše simulirana u literaturi prihvaćenim modelom pomerajućih kišnih ćelija. U ovoj disertaciji usvojeno je da kišna ćelija ima Gausov profil, kružnu osnovu i opisana je sa četiri parametra: maksimalnim intenzitetom kiše u centru kišne ćelije, karakterističnim rastojanjem, intenzitetom vektora brzine i azimutom vektora brzine.

Na nivou jedne RR70GHz predložen je novi ključni indikator performansi FT_{RC} , koji predstavlja ukupnu količinu prenetih podataka za vreme kišnog događaja. Analizom njegove

vrednosti za različite intenzitete kiše u centru kišne ćelije i karakteristična rastojanja dobija se opseg vrednosti parametara kišne ćelije koji utiču na degradaciju performansi ove veze. Na taj način je simulirana dinamika varijacije kapaciteta veze uzrokovane varijacijom intenziteta kiše za vreme trajanja kišnog događaja i njen uticaj na performanse koje oseća krajnji korisnik koji prenosi datoteke.

U disertaciji je, takođe, izvršena i generalizacija ovog principa na nivou cele mreže MRR70GHz. Da bi se to ostvarilo, pored menjanja kapaciteta veze izazvano kišom, potrebno je simulirati i reakciju mreže na promene fizičkom sloju kao i ponašanje korisnika. Glavni parametar koji se posmatra je kapacitet veze dodeljen saobraćajnom zahtevu koji se usrednjava u toku vremena integracije. Trajanje vremena integracije zavisi od vrste servisa koji se simulira te je u ovoj disertaciji usvojeno da visokointeraktivnim servisima kao što su VoIP prenos govora i videotelekonferencija odgovara vreme integracije od 1s, manje interaktivnim servisima kao što je prenos audio i video sekvenci odgovara vreme integracije od 10s, dok neinteraktivnim servisima kao što je prenos datoteka odgovara vreme integracije od 60s. Definisana su dva nova ključna indikatora performansi: a) kapacitet dodeljen jedinom korisniku C-OU koji je namenjen za analizu raspoloživosti servisa i performansi mreže u uslovima slabog saobraćaja i b) kapacitet dodeljen korisniku pri proporcionalno fer raspodeli kapaciteta u mreži C-FCD koji je namenjen za analizu performansi mreže pri velikom opterećenju. Vrednosti oba nova ključna indikatora performansi se analiziraju na osnovu kumulativne funkcije raspodele na godišnjem nivou uz dodatnu statističku obradu po svim nenultim saobraćajnim zahtevima u mreži za određivanje minimalne, medijalne i maksimalne vrednosti.

Za interpretaciju iskustva korisnika na osnovu poznavanja kumulativne funkcije raspodele novih ključnih indikatora performansi C-OU i C-FDC na godišnjem nivou, potrebno je poznavanje godišnjih statističkih parametara slabljenja usled kiše na svim RR70GHz u MRR70GHz, kao i korelisanosti slabljenja usled kiše između različitih RR70GHz. U do sada objavljenim rezultatima susreću se dva pristupa: a) na osnovu određivanja slabljenja na radio relejnim vezama i parametara korelisanosti između paralelnih radio-relejnih pravaca i radio-relejnih pravaca koji se stiču u zajedničkoj tački i b) na osnovu dvodimenzionalne raspodele kiše na osnovu koje se računa slabljenje na svakoj od radio-relejnih veza. Glavnim nedostatak prvog metoda je ograničenje na frekvencijske opsege do oko 50GHz i što složenost raste sa brojem mogućih putanja kroz mrežu, te je nepodesan za

primenu u MRR70GHz. Drugi metodi se baziraju na sintezi "radarskih slika" dvodimenzionalne raspodele intenziteta kiše čime se verno reprodukuje kumulativna funkcija raspodele intenziteta kiše na godišnjem nivou. Glavni nedostatak ovih metoda je potreba za angažovanjem velikih računarskih resursa, budući da je za simulaciju dinamičkog procesa reakcije MRR70GHz na promene na fizičkom sloju potrebna rezolucija u vremenu reda veličine 1s. Takođe, pošto se radarske slike generišu nezavisno jedna od druge, postoji problem grupisanja radarskih slika u kišne događaje koji bi simulirali statističke parametre broja kišnih događaja i kretanja kišnih masa na godišnjem nivou.

Da bi se prevazišao ovaj nedostatak do sada predloženih metoda, u ovoj disertaciji je predložen novi metod za dinamičku simulaciju dvodimenzionalne raspodele intenziteta kiše. Novi model na užem geografskom području tipičnih dimenzija do oko 10x10km uspešno reprodukuje pretpostavljene godišnje statističke parametre u pogledu kumulativne funkcije raspodele intenziteta kiše, broja kišnih događaja u kojima je prevaziđena vrednost specificiranog praga intenziteta kiše, intenziteta vektora brzine kretanja kišnih masa i azimuta vektora brzine kretanja kišnih masa. Odstupanja simuliranih vrednosti od pretpostavljenih se detektuju mrežom virtualnih kišnih sondi. Tolerancije za data odstupanja dobijena su na osnovu analize izmerenih podataka za 2001. godinu, dobijenih sa mreže od osam kišnih sondi instaliranih u okolini grada Boltona, Velika Britanija, na međusobnim rastojanjima od oko 2 do 3km. Pokazano je da prosečne raspodele odstupaju od pretpostavljenih za manje od 3% u opsegu intenziteta kiše od interesa. Validnost modela je potvrđena činjenicom da su odstupanja na individualnim virtualnim kišnim sondama od prosečne vrednosti u opsegu intenziteta kiše od interesa manja nego što su dobijena odstupanja u Bolton eksperimentu na realnim kišnim sondama u odnosu na prosečnu vrednost. Informativni ulazni parametri za kumulativnu funkciju raspodele intenziteta kiše i broj kišnih događaja za dato geografsko područje se mogu preuzeti iz ITU-R preporuka, dok se precizniji podaci mogu dobiti obradom podataka iz globalnih hidrometeoroloških baza podataka ERA-15 i ERA-40 ili lokalnih institucija. Ograničenje važnosti modela na užem geografskom prostoru od 10x10km potiče od pretpostavke da se mreža u jednom trenutku nalazi pod uticajem jedne kišne ćelije. Za proširenje verodostojnosti modela za šire geografsko područje potrebno je modelovati procese rađanja i raspadanja kišnih ćelija, kao i postojanje više od jedne ćelije u mreži uz održavanje konstantnosti vektora kretanja kišnih masa, što predstavlja jedan od pravaca daljeg istraživanja.

Prikazani metod zajedničke implementacije modela godišnje raspodele intenziteta kiše na području na kome je instalirana MRR70GHz i uprošćenog matematičkog modela za simulaciju prelaznih pojava MRR70GHz i određivanje kumulativne funkcije raspodele novih ključnih indikatora performansi C-OU i C-FCD, omogućava efikasno korišćenje računarskih resursa zahvaljujući algoritmu za početnu selekciju kišnih ćelija koje imaju uticaj na promenu parametara mreže, te se pri proračunu vrednosti novih ključnih indikatora performansi C-OU i C-FCD uzima samo njihov uticaj i vrednosti ovih parametara u odsustvu kiše. Ova ušteda u procesorskom vremenu je posebno značajna pri proračunu ključnog indikatora performansi C-FCD koji zbog optimizacionog postupka, zahteva veliki broj računskih operacija.

Simulacija na test mreži pokazala je efikasnost predloženog metoda za analizu performansi MRR70GHz na godišnjem nivou. Pokazano je da za komunikaciju na frekvencijskom opsegu iznad 70GHz upotreba sistema prenosa sa paketskom komutacijom u odnosu na sisteme prenosa sa komutacijom kola ima veliku prednost u pogledu povećanja vremena raspoloživosti komunikacije koja se postiže zahvaljujući mogućnosti preraspodele i preusmeravanja saobraćaja u usmerivačima. Takođe, rezultati ukazuju na problem za smanjenje neraspoloživosti ispod 0.01% vremena za visoko interaktivne servise poput VoIP i videotelekonferencije u MRR70GHz samo primenom standardnih protokola usmeravanja i zaštitnih putanja, te je potrebno uraditi dalja istraživanja u cilju poboljšanja performansi MRR70GHz. Prenos datoteka moguć je i za standardne protokole usmeravanja sa visokim procentom neraspoloživosti reda veličine 0.001%, s tim što metode zaštite saobraćaja poboljšavaju brzinu prenosa.

Predloženi metod za procenu performansi MRR70GHz takođe omogućava formiranje granice u pogledu parametara kišnih ćelija čiji uticaj rezultuje neprihvatljivo lošim performansama MRR70GHz za realizaciju određenih tipova servisa, te ih nema smisla detaljnije analizirati. Uticaj kišnih ćelija koje uzrokuju manje značajne promene u mreži u odnosu na datu granicu se može dalje analizirati na nivou paketa upotrebom alata poput NS2 ili OPNET, ili simulirati u virtualnom okruženju. Formiranje novih simulacionih okruženja takođe predstavlja pravac daljeg istraživanja u ovoj oblasti.

8. LITERATURA

- [Akimoto 04] M.Akimoto, K.Watanabe, "Study on Rain Attenuation Considering Rainfall-Intensity Dependent Spatial Correlation Characteristics", *Proc of GLOBECOM '04*, Dallas, 2004, Vol.5. pp 2864 – 2868.
- [Akuon 11] P. O. Akuon, T. J. O. Afullo, "Rain Cell Sizing for the Design of High Capacity Radio Link Systems in South Africa", *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 35, pp. 263-285, 2011.
- [Binaghi 92] M. Binaghi, A.P. Bonati, "Statistical Dependence of Rain Occurence in Multiple Site Case Modelled With Dynamical Radar Derived Parameters Abstract", *Proc of ISAP '92*, Sapporo, Japan, 1992, pp 1053-1056.
- [Bolton 06] Natural Environment Research Council [contributors: Holt, A.; Upton, G.; Rahimi, A.; Baxter, P.]. The Bolton Experiment, NCAS British Atmospheric Data Centre, 2006, Data available from: http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk__ATOM__dataent_bolton.
- [Bonati 02] A.P. Bonati, "No Rain Intervals Within Rain Events: Some Statistics Based on Milano Radar and Rain-Gauge Data", COST Action 280, 1st International Workshop, Jul. 2002.
- [Bonati 86] A. Bonati, "Rain Patterns Motion over a Region Deduced from Radar Measurements", *Alta Frequenza (English Edition)* (ISSN 0002-6557), Vol. 55, pp. 99-103, Mar.-Apr.1986.
- [Bonati 99] A. P. Bonati, "Essential Knowledge of Rain Structure For Radio Application Based on Available Data and Models", *Radio Africa* 99, October 1999
- [Brown 01] P.E. Brown, P.J. Diggle, M.E. Lord, P.C. Young, "Space-time Calibration of Radar Rainfall Data", *Applied Statistics*, Vol. 50, Issue 2, pp. 221–241, 2001.

- [Callaghan 04] S.A. Callaghan "Fractal Analysis and Synthesis of Rain Fields for Radio Communication Systems", PhD thesis, University of Portsmouth, June 2004.
- [Callaghan 08] S.A. Callaghan, "Generating Year-Equivalent Databases of Fractally Synthesised Rain Rate Fields", *Proc. of ISART*, pp. 220-230, Boulder, Colorado, USA, June 2008.
- [Capsoni 08] C. Capsoni, M. D'Amico, P. Locateli, "Statistical Properties of Rain Cells in the Padana Valley", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 25, pp. 2230–2244, December 2008.
- [Capsoni 87] C. Capsoni, F. Fedi, Magistroni C., Paraboni A., Pawlina A., "Data and Theory for a New Model of the Horizontal Structure of Rain Cells for Propagation Applications", *Radio Science*, Vol. 22, Issue 3, pp. 395-404, May-June 1987.
- [Capsoni IJRS-09] C. Capsoni, L. Luni, "Analysis of Spatial and Temporal Properties of Rain Cells for Rainfall Modeling Purposes", *Italian Journal of Remote Sensing*, 41(3), pp. 51-62, 2009.
- [Capsoni TAP-09] C. Capsoni, L. Luni, "A Physically Based Method for the Conversion of Rainfall Statistics From Long to Short Integration Time", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol.57, No.11, pp. 3692 - 3696, November 2009.
- [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.
- [Chen 12] F. W. Chen, C. W. Liu, "Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in middle of Taiwan", *Paddy and Water Environment*, Vol. 10, Issue 3, pp 209-222, September 2012.
- [Cioni 03] S. Cioni, R. De Gaudenzi, R. Rinaldo., "Adaptive Coding and Modulation for the Forward Link of Broadband Satellite Networks", in *Proc GLOBECOM'03*, San Francisco 2003, Vol.6 , pp. 3311 - 3315.
- [Crane 80] R. K. Crane, "Prediction of Attenuation by Rain", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 28 , Issue 9, pp. 1717 - 1733, September 1980.

- [Dahlman 11] E. Dahlman, S. Parkval, J. Skold, *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*, Elsevier Ltd., 2011.
- [Dijkstra 59] E. W. Dijkstra, "A Note on Two Problems in Connexion with Graphs", *Numerische Mathematik 1*, pp. 269–271, 1959.
- [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] L. D. Emiliani, L. Luini, C. Capsoni, "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, Issue 3, pp. 70 - 84, June 2009.
- [EN 301 785] ETSI EN 301 785 V1.2.1 (2001-10), "Fixed Radio Systems; Point-to-Point Packet Data Equipment; Parameters for radio systems with packet data interfaces for transmission of digital signals operating in the frequency range 7, 8, 13, 15, 18, 23, 26, 28, 32, 38, 52 to 55 GHz", European Telecommunications Standard Institute, 2001.
- [EN 302 217] ETSI EN 302 217-4-2 V1.3.1 (2007-10) "Fixed Radio Systems; Characteristics and requirements 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", European Telecommunications Standard Institute, 2007.
- [Enjamio 03] C. Enjamio, E. Vilar, F.P. Fontan, A. Redano, D. Ndzi, "Dimensions and Dynamic Evolution of Microscale Rain Cells", presented at the 2nd International Workshop ES TEL, Noordwijk, May 2003.
- [Enjamio 07] C. Enjamio, E. Vilar, F. Pérez-Fontán, "Rain Scatter Interference in mm-Wave Broadband Fixed Wireless Access Networks Caused by a 2-D Dynamic Rain Environment", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 6, Issue 7, pp. 2497 - 2507, July 2007.
- [ERA-15] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ERA-15 database, available on: <http://www.ecmwf.int/research/era/ERA-15/>
- [ERA-40] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ERA-15 database, available on: <http://www.ecmwf.int/research/era/do/get/era-40>

8. LITERATURA

- [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 of Opinion and Order, Federal Communications Commission, March 3, 2005.
- [Feral 03] L. Feral, J. Lemorton, C. Laurent, H. Sauvageot, "Hycell: A New Model of Rain Fields and Rain Cells Structure", *Radio Science*, Vol. 38, Issue 3, pp. 1056, June 2003.
- [Forero 08] C. A. V. Forero, A. Seed, D. Sempere-Torres, G. Pegram, "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 08] M. Garcia, C.D. Peters-Lidard, D.C. Goodrich, "Spatial Interpolation of Precipitation in a Dense Gauge Network for Monsoon Storm Events in the Southwestern United States", *Water Resources Research*, Vol. 44, Issue 5, W05S13, May 2008.
- [Garcia 93] J.J. Garcia-Lunes-Aceves, "Loop-Free Routing Using Diffusing Computations", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 1, Issue 1, pp. 130-141, February 1993.
- [Goldhirsh 92] J. Goldhirsh, B.H. Musiani, "Dimension Statistics of Rain Cell Cores and Associated Rain Rate Isopleths Derived from Radar Measurements in the Mid-Atlantic Coast of the United States", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol 30, Issue 1, pp. 28-37, January 1992.
- [Goldsmith 05] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2005.
- [Gremont 04] B. C. Gremont, M. Filip, "Spatio-Temporal Rain Attenuation Model for Application to Fade Mitigation Techniques", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 52, Issue 5, pp. 1245 - 1256, May 2004.
- [Hendrantoro 06] G. Hendrantoro, I.T. Suryani, A. Mauladiyanto, "A Multivariate Autoregressive Model of Rain Attenuation on Multiple Short Radio Links", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 5, Issue 1, pp. 54 - 57, December 2006.
- [Hendrantoro 10] G. Hendrantoro, A. Matsushima, "Measurement and reanalysis of Rain Intensity and Attenuation for the Design and Evaluation of Microwave and

- Millimeter-wave Communication Systems", *Microwave and Millimeter Wave Technologies: Modern UWB antennas and equipment*, Igor Minin (Ed.), InTech, 2010.
- [Hirata 09] A. Hirata, H. Takahashi, T. Kosugi, K. Murata, K. Naoya, Y. Kado, "Rain Attenuation Statistics for a 120-GHz-Band Wireless Link", *International Microwave Symposium Digest*, Boston, June 2009, pp. 933-936.
- [ITU-R P.837-1] Rec. ITU-R P.837-1, "Characteristics Of Precipitation For Propagation Modelling (Question Itu-R 201/3)", International Telecommunication Union, 1994.
- [ITU-R Rec. F.1668] Rec. ITU-R P.1668-1, "Error Performance Objectives for Digital Fixed Wireless Links Used in 27500km Hypothetical Reference Path and Connection", International Telecommunication Union, 2007.
- [ITU-R Rec. F.1703] Rec. ITU-R P.1703-1, "Availability Objectives for Real Digital Fixed Wireless Links Used in 27500km Hypothetical Reference Path and Connections", International Telecommunication Union, 2005.
- [ITU-R Rec. P.676] Rec. ITU-R P.676-5, "Attenuation by Atmospheric Gases", International Telecommunication Union, 2001.
- [ITU-R Rec. P.838-3] Rec. ITU-R P.838-3, "Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods", International Telecommunication Union, 2005.
- [ITU-R Rec.P.530-14] ITU-R Rec. P.530-13, "Propagation Data and Prediction Methods Required for Design of Terrestrial Line of Sight Systems", International Telecommunication Union, 2012.
- [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", International Telecommunication Union, 1999.
- [ITU-T G.827] ITU-R Rec. G.827, "Availability Performance Parameters and Objectives For End", International Telecommunication Union, 2003.
- [ITU-T H.323] ITU-R Rec. H.323, "Packet-based Multimedia Communications Systems", International Telecommunication Union, 2009.
- [ITU-T X.210] ITU-T Rec. 210, "Information Technology - Open Systems Interconnection - Basic Reference Model: Conventions for the Definition of OSI Services", International Telecommunication Union, 1994.

- [ITU-T Y.1001] ITU-T Rec. Y.1001, "IP framework, A Framework For Convergence Of Telecommunications Network And IP Network Technologies", International Telecommunication Union, 2000.
- [ITU-T Y.1540] ITU-T Rec. Y.1540, "Internet Protocol Data Communication Service- IP Packet Transfer and Availability Performance Parameters", International Telecommunication Union, 2011.
- [ITU-T Y.1541] ITU-T Rec. Y.1541, "Network Performance Objectives for IP-based Services", International Telecommunication Union, 2011.
- [ITU-T Y.1542] ITU-T Rec. Y.1542, "Framework for Achieving End-to-End IP Performance Objectives", International Telecommunication Union, 2010.
- [ITU-T Y.1561] ITU-T Rec. Y.1561, "Performance and Availability Parameters for MPLS Networks", International Telecommunication Union, 2004.
- [ITU-T Y.1563] ITU-T Rec. Y.1563, "Ethernet Frame Transfer and Availability", International Telecommunication Union, 2009.
- [Ivanek 89] Ivanek F., editor, *Terrestrial Microwave Communications*, Artech House, 1989.
- [Jabbar 08] A. Jabbar, B. Raman, B. Frost, J. Sterbenz, "Weather Disruption-Tolerant Self-Optimizing Millimeter Mesh Networks", *Proc of Third International IFIP/IEEE Workshop on Self-Organizing Systems (IWSOS 2008)*, Vienna, pp.242-255. 2008.,
- [Kvicera 10] V. Kvicera, M. Grabner, "Rain Attenuation on Terrestrial Wireless Links in the mm Frequency Bands, Advanced Microwave and Millimeter Wave Technologies Semiconductor Devices Circuits and Systems", Moumita Mukherjee (Ed.), ISBN: 978-953-307-031-5, InTech, DOI: 10.5772/8758. Available from: <http://www.intechopen.com/books/advanced-microwave-and-millimeter-wave-technologies-semiconductor-devices-circuits-and-systems/rain-attenuation-on-terrestrial-wireless-links-in-the-mm-frequency-bands>, 2010.
- [Liebe 91] H. J. Liebe, G. A. Hufford, T. Manabe, "A Model for the Complex Permittivity of Water at Frequencies Below 1 THz", *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 12, No. 7, pp.659-675., 1991.
- [Lin 83] S. Lin, D. Costello. *Error Control Coding*, Prentice Hall, 1983.

- [Luni 11] L. Luni, C. Capsoni, "MultiEXCELL: A New Rain Field Model for Propagation Application", *IEEE Transactionns on Antennas and Propagation*, Vol 59., No 11, pp4286 - 4300, November 2011.,
- [Marshall 48] J.S.Marshall, W. McK.Palmer, "The Distribution of Raindrops WithSize," *Journal of Atmospheric Science*, Vol. 5, no. 4, pp. 165–166, 1948.
- [Matricciani 00] E. Matricciani, A. Pawlina, "Statistical Characterization of Rainfall Structure and Occurrence for Convective and Stratiform Rain Inferred From Long Term Point Rain Rate Data", *In Proc of AP 2000 Millennium Conference on Antennas & Propagation*, Davos, Switzerland, 9-14 April 2000.
- [Metzger 12] F. Metzger, A. Rafetseder, K. Tutschku, "A Performance Evaluation Framework for Video Streaming", *In Proc of IEEE 19th International Packet Video Workshop (PV)*, pp. 19 - 24, Vienna, Austria, May 2012.
- [Montopoli 06] M.Montopoli,F. S. Marzano, G.Vulpiani, A . Fornasiero, P.P.Alberoni, L. Ferraris, N.Rebora, "Spatial Characterization of Raincell Horizontal Profiles From C-band Radar Measurements at Mid-latitude", *Advances in Geosciences*, Vol. 7, pp.285–292, 2006.
- [Montopoli 07] M.Montopoli, F. S.Marzano, "Maximum-Likelihood Retrieval of Modeled Convective Rainfall Patterns from Midlatitude C-Band Weather Radar Data", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol 45, No. 7, July 2007.
- [Newman 04] P.Newman, "In Search of the All-IP Mobile Network", *IEEE Radio Communications*, pp. s3-s8, December 2004.
- [Northrop 05] P.J.Northrop, T.M.Stone, "A Point Process Model for Rainfall withTruncated Gaussian Rain Cells", *Research Report No.251, Department of Statistical Science*, University College London, March, 2005.
- [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] <http://www.opnet.com>

- [Panagopoulos 06] A.D.Panagopoulos, P.V.Skouloudakis, "Quality of Service of Broadband Fixed Wireless Access QPSK Channels Interfered by Adjacent Terrestrial Links", *IEEE Transactions on Antennas and Propagations*, Vol 54, No 11, pp. 3317 - 3326, November 2006.
- [Pastoriza-09] V.Pastoriza, A.Nunez,P. Marino, F.P.Fontan, "Radar Rain Cell Identification and Modeling in the North-West of Spain",*In Proc. Vehicular Technology Conference*, pp1 - 5, Barcelona, Spain, 2009.
- [Pathirana 02] A. Pathirana, S. Herath, "Multifractal Modelling and Simulation of Rain Fields Exhibiting Spatial Heterogeneity", *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 6, No. 4, pp. 695-708, 2002.
- [Paulson 04] K.S Paulson., "Fractal Interpolation of Rain Rate Time-Series", *Journal of Geophysics Research - Atmospheric*, Vol. 109,No. D22, art no D22102, published online: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004JD004717> November 2004.
- [Pepelnjak 99] I. Pepelnjak, *EIGRP Network Design Solution*, CISCO Press, 1999.
- [Perić 12 - OTEH] M. Perić, D. Perić, V. Orlić, "Interference Calculation in a Radio-relayNetwork at Frequencies Above 70GHz", *In Proc of OTEH 2012, 5th International Scientific Conference on defensive technologies CD ROM*, Belgrade, Serbia, 2012.
- [Peric IEEE CL 10] D. Perić, M. Perić, B. Todorović, "Traffic Protection Method in IP Radio Networks above 70 GHz", *IEEE Communications Letters*, Vol. 14, No. 10, pp. 981-983, October 2010
- [Peric Dr 11] D. Perić, *Metode za zaštitu saobraćaja u IP radio mrežama iznad 70GHz*, doktorska disertacija, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, 2011.
- [Peric 09] M. Perić, D. Perić, D. Obradović, V. Orlić., "Concept of Signal Processing in Ultra-High Capacity (1Gbit/s) Millimeter Wave IP Digital Radio", *In Proc of XLIV International Scientific Conference of Information, Communication and Energy Systems and Technologies - ICEST 2009*, Vol. 1, pp. 107-110, Veliko Tarnovo, Bulgaria, June 2009.
- [Peric ETRAN 05] D. Perić, M. Perić, "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] D. Perić, M. Perić, "Simulator rutin protokola u okruženju Wolfram Research Mathematica", *Zbornik radova 51. Konferencije ETRAN*, str. TE 4.4.1-4.4.4, Herceg Novi, 2007.
- [Peric ETRAN 10] D. Perić, M. Perić, "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] D. Perić, M. Perić, G. Petrović, "Redundant Topology in Computer Network Realized with Millimeter Wave Radio Links", *In Proc. of 14th IST Mobile and Wireless Summit*, Dresden, Germany, June 2005.
- [Perić JEEE 2012] M. Perić, D. Perić, B. Todorović, A New Approach to Performance Analysis of Point-to-Point radio Links at Frequencies Above 70GHz, *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 63, No. 1, pp. 35–40, 2012,
- [Peric SPECTS 07] D. Perić, M. Perić, G. Petrović, "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
- [Perić-D-Telfor 2012] D. Perić, B. Todorović, "Realization of Novel Routing Protocols for IP Radio Networks above 70 GHz in MPLS", 20th Telecommunications forum TELFOR 2012, Belgrade, 2012.
- [Peric-M Telfor-2012] M. Perić, D. Perić, B. Todorović, M. Šunjevarić, M. Popović, "Quality Merit for Performance Optimization in IP Radio-Relay Network Above 70GHz", *In Proc of 20th Telecommunications forum TELFOR 2012 CD ROM*, Belgrade, 2012.
- [Perros 05] H. G. Perros, *Connection-oriented Networks SONET/SDH, ATM, MPLS and OPTICAL NETWORKS*, John Wiley & Sons, 2005
- [Pioro 04] M. Pioro, D. Medhi, *Routing, Flow, Capacity Design in Communication and Computer Networks*, Morgan Kaufmann, 2004
- [Retana 99] A. Retana, D. Slice, R. White, *Advanced IP Network Design (CCIE) Professional Development*, CISCO Press, 1999
- [RFC 1058] RFC 1058 Routing Information Protocol (RIP)
- [RFC 2328] RFC 2328 Open Shortest Path First (OSPF) routing protocol

- [RFC 791] RFC 791 Internet Protocol (IP)
- [RFC 959] RFC 959: File transference protocol (FTP)
- [Rodriguez-Iturbe 87] I. Rodriguez-Iturbe, P. Eagleson, "Mathematical Models of Rainstorm Events in Space and Time", *Water Resources Research*, Vol. 23., No 1.,pp. 181-190, January, 1987.
- [Sauvageot 99] H. Sauvageot, F. Mesnard, R.S. Tenorio, "The Relation Between the Area-Average Rain Rate and the Rain Cell Size Distribution Parameters", *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol 56, pp. 57–70, January, 1999.
- [Schwartz 87] M. Swartz, *Telecommunication networks: protocols, modeling and analysis*, Addison-Wesley Pub. Co., 1987.
- [Sinka 02] C. Sinka, B. Lakatos, J. Bitó, "The Effects of Moving Rain Cell over LMDS Systems", *COST A280, 1st International Workshop*, July 2002.
- [Siti 09] K. Siti, Z. Azami, M.R. Ahmad, S.Z. Mohd, I. Kamarulzaman, S. Kamaruzzaman., "Analyzing the East Coast Malaysia Wind Speed Data", *International Journal of Energy and Environment*, Issue 2, Vol. 3, pp.53-60, 2009.
- [Šunjevarić 12] M. Šunjevarić, B. Todorović, "Radio-relejne i satelitske komunikacije", Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, edicija "Tehničke nauke-monografije", br. 51., 2012.
- [Tjelta 08] T. Tjelta, T.O.Breivik, "Preliminary Analysis of Radiowave Propagation Data Using a Gigabit Radio Link Operating at 83.5GHz Close to Oslo in Norway", *In Proc of The International Symposium on Advanced Radio Technologies/ClimDiff 2008*, pp 195-201, Boulder, Colorado, 2008.
- [Townsend 10] A. Townsend, R.J.Watson, "A Study of the Horizontal Structure of Rain Cells in the U.K. Using the EXCELL and HYCELL model", *In Proc of Fourth European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2010*, pp. 1-5, CCIB, Barcelona, Spain, 2010.
- [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*, European Telecommunication Standards Institute, 2007.

- [TS 132 450] ETSI TS 132 450 V8.4.0 (2011-10), *Key Performance Indicators (KPI) for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN): Definitions*, European Telecommunication Standards Institute, 2011.
- [Upton 02] G. A. Upton, "A Correlation-Regression Method for Tracking Rainstorms Using Rain-Gauge Data", *Journal of Hydrology*, Vol. 261, issue 1-4, pp. 60-73, April, 2002.
- [van de Kamp 02] M. van de Kamp, "Short-term Prediction of Rain Attenuation Using Two Samples", *Electronics Letters*, Vol.38, No. 23, pp. 1476 - 1477, November, 2002.
- [VMware] <http://www.vmware.com>
- [Wells 06] J. Wells., "Multigigabit Wireless Technology at 70 GHz, 80 GHz and 90 GHz", *RF Design*, pp.50-58, May 2006,
- [Wolfram 03] S. Wolfram, *The Mathematica Book*, 5th ed., Wolfram Media, 2003.
- [Xiong 00] F. Xiong, *Digital Modulation Techniques*, Artech House, 2000.
- [Zhang 08] X. Zhang, *Fine Scale Modelling of Rain Fields for Radio Network Simulation*, PhD Thesis, University of Hull, 2008.
- [Zhang 09] X. Zhang, K. S. Pulsons, "The Simulation of Rain Fade on Arbitrary Microwave Links Networks by the Interpolation of Rain Radar Data", *In Proc. of Third European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2009*, pp. 350 - 354, Berlin, Germany, 2009.