

# Simulacijska analiza utjecaja zavisnih kvarova na raspoloživost optičke transportne mreže

Vedran Miletić

Odjel za informatiku Sveučilišta u Rijeci, Zavod za komunikacijske sustave

Omladinska 14, 51000 Rijeka

*vmiletic@inf.uniri.hr*

**Sažetak**—Rastuće brzine prijenosa optičke komunikacijske tehnologije postavljaju pitanje zaštite i oporavka mreže u slučaju pojave kvarova, obzirom da oni utječu na raspoloživost usluga koje mreža nudi. Povećanje broja čvorova i veza u mreži rezultira povećanjem učestalosti dvostrukih kvarova. Zbog činjenice da nije uvijek moguće osigurati prostornu razdvojenost kabela povećava se i broj zavisnih kvarova, kod kojih kvar jednog mrežnog elementa rezultira kvarom jednog ili više drugih. Rad započinje pregledom osnovnih termina optičke komunikacijske tehnologije i raspoloživosti mreže, zatim se analiziraju višestruki kvarovi i zavisni kvarovi, a naposljetku govorimo o pristupima izračunu pouzdanosti mreže; zbog složenosti analitičkog pristupa naglasak se stavlja na simulacijske metode i daje se pregled alata koji ih implementiraju.

**Ključne riječi**—optička transportna mreža, raspoloživost mreže, zaštita, obnavljanje, višestruki kvarovi, zavisnost kvarova, Monte Carlo simulacija, simulacija mreže

## I. UVOD

Razvoj društva u skladu s mogućnostima koje nudi informacijsko-komunikacijska infrastruktura u proteklih dvadesetak godina uvjetuje potrebu za mrežama sve veće brzine prijenosa. U potrebi za prijenosnim kapacitetima dominira podatkovni promet, koji bilježi značajan rast. 2000. godine je količina prenesenog podatkovnog prometa premašila telefonski (iako se očekivalo da će se to dogoditi i ranije), a od tada raste otprilike 100% godišnje [1]. Čak i u državama u razvoju, više nije neobično da postoji relativno velik broj korisnika širokopolasnog pristupa internetu. U Hrvatskoj je krajem 2010. bilo 1.132.212 korisnika širokopolasnog pristupa, što predstavlja povećanje od 20,8% u odnosu na kraj 2009. godine [2]. Pored toga, ponuda triple play usluga (fiksni telefon, širokopolasni pristup internetu i televizijski kanali preneseni putem interneta) je u porastu, te se može očekivati povećanje godišnjeg porasta podatkovnog prometa.

U današnjim mrežama podaci se jednim svjetlovodnim vlaknom mogu prenositi desecima valnih kanala, od kojih svaki omogućuje brzine reda veličine 10 Gbit/s. Svaki kvar koji se dogodi na mreži značajno narušava rad mrežnih usluga, što ima za posljedicu nezadovoljstvo korisnika tih usluga i time smanjen prihod telekom operatera. Telekom operaterima je zato, pored brzine pristupa, cilj osigurati i raspoloživost usluga koje mreža nudi osiguravanjem raspoloživosti mreže.

Povećanje raspoloživosti mreže postiže se metodama zaštite (protection) i obnavljanja (restoration) kojima se određuje raspodjela rezervnih resursa (uređaji i kabele) u slučaju kvara

neke od osnovnih resursa mreže. Međutim, pogotovo s porastom veličine mreže u smislu broja instaliranih komponenata i kilometara kabela, može se nezavisno dogoditi drugi kvar za vrijeme dok prvi još nije otklonjen ili se može dogoditi kvar većeg broja komponenata pod zajedničkim utjecajem. Primjerice, u slučaju kad dva kabela na izlazu iz čvora dijele isti fizički put prekid jednog kabela u najvećem je broju slučajeva popraćen prekidom i drugog kabela, obzirom da se najveći broj prekida kabela (gotovo 60%) događa zbog iskapanja [3].

Analitički pristup izračunu raspoloživosti uzima u obzir raspoloživost svakog pojedinog elementa i na temelju načina na koji su elementi povezani određuje raspoloživost mreže. U prisustvu zavisnosti kvarova elemenata analitički pristup postaje presložen, te je potrebno upotrijebiti aproksimativne metode. Pored niza heurističkih metoda koje se mogu koristiti, Monte Carlo simulacija jedan je od mogućih pristupa [4].

U ovom trenutku nijedan od mrežnih simulatora otvorenog koda koji se aktivno koriste u znanstvenoj zajednici nema implementiran adekvatan model raspoloživosti optičke transmisijske mreže, međutim zbog proširovog dizajna simulatora postoji mogućnost razvoja dodatnih modula s tom funkcionalnosti. Dosadašnji pristupi modeliranju kvarova čvorova i veza [5] i komponenata optičke mreže [6] mogu se pritom iskoristiti kao smjernice.

Rad je koncipiran kako slijedi: prvo je opisana optička transmisijska mreža, zatim su definirani osnovni pojmovi raspoloživosti mreže. Nakon opisa osnovnih svojstava višestrukih kvarova, detaljnije su analizirani zavisni kvarovi koji su njihova podvrsta. Zatim je dan opis osnovne programske podrške koja će se koristiti u istraživanjima. Naposljetku su navedene moguće teme istraživanja i dan je zaključak.

## II. OPTIČKA TRANSMISIJSKA MREŽA

Optička transmisijska mreža razvija se u zadnja tri desetljeća s rastućim brzinama prijenosa u skladu s porastom potreba telekomunikacijskih usluga. Današnji sustavi sve češće koriste gusto valno multipleksiranje (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) i omogućuju brzine od 40 Gbit/s. Pored uvođenja DWDM-a i erbijem dopiranih optičkih pojačala (erbium-doped fiber amplifiers, EDFA), uvođenje transparentnih optičkih prospojnika (Optical Cross-Connect, OXC) omogućuje brzu rekonfiguraciju valnih puteva u mreži, primjerice korištenjem protokola Generalized Multi-Protocol

Label Switching (GMPLS) [7]. Kako je cilj da se i prijenos i komutacija u potpunosti događaju u optičkoj domeni upravljani pomoću Internet Protokola (Internet Protocol, IP), često se govori o arhitekturi IP preko WDM-a (IP-over-WDM) ili IP preko optike (IP-over-optics).

Telekomunikacijsku mrežu kod razmatranja dijelimo u tri osnovne razine [8]:

- jezgrena mrežu (core network),
- gradsku mrežu (metro network) i
- pristupnu mrežu (access network).

Jezgrena mreža sastoji se od čvorova povezanih DWDM optičkim vezama uz upotrebu optičkih pojačala. Geografske udaljenosti povezane jezgrenom mrežom iznose od nekoliko stotina kilometara kada se radi o povezivanju država do nekoliko tisuća kilometara kada se radi o povezivanju kontinenata. Jezgrena mreža najčešće ima isprepletenu topologiju (mesh topology).

Gradska mreža pokriva područje grada i eventualno bliže okolice (udaljenost od nekoliko desetaka do stotinjak kilometara), a u najvećem broju slučajeva ima prstenastu topologiju (ring topology).

Pristupna mreža je uglavnom zasnovana na pasivnim optičkim mrežama (Passive Optical Network, PON) i koristi multipleksiranje u vremenskoj domeni [9]. Koristi se stablasta (tree) i/ili zvjezdasta (star) topologija. Pristupna mreža pokriva udaljenosti do nekoliko desetaka kilometara. Cilj je dovesti optičko vlakno što bliže korisniku (Fiber To The Home, Fiber To The Curb i općenito FTTx). Optička vlakna u pristupnim mrežama zamjenjuju ranije korištenu bakarnu paricu i time osiguravaju mogućnost povećanja prijenosnih kapaciteta po potrebi. Posljedica toga je povećanje zahtjeva za prijenosnim kapacitetima jezgrene i gradske mreže te sveukupni porast prenesenog prometa [1].

Optička telekomunikacijska mreža razvila se od telefonske mreže, a razvija se u smjeru mreže slijedeće generacije (Next Generation Network, NGN) koja podržava prijenos podataka, glasa i audio-video sadržaja korištenjem jedne paketski orijentirane infrastrukture. Tu infrastrukturu će karakterizirati visok nivo raspoloživosti, prijenosne brzine prilagodljive sukladno potrebama te efikasno upravljanje mrežom. Upravljanje mrežom osigurava korisnicima odgovarajuću kvalitetu usluge (Quality of Service, QoS) u skladu s ugovorom o razini usluge (Service-level Agreement, SLA) sklopljenim između telekom operatora i korisnika.

Očekuje se da će većina usluga prijeći iz analogne u digitalnu domenu (npr. distribucija filmova, TV programa i igara) te da će se povećati dostupnost i upotreba e-usluga u različitim domenama (platni promet, državna uprava, školstvo, medicina, zakonodavstvo, sigurnost). Sve navedene primjene, bilo da su vezane uz kućne ili poslovne korisnike, zahtijevaju pored vrlo velike pristupne brzine i osiguranje kvalitete usluge, što implicira potrebu za osiguranjem raspoloživosti mreže.

### III. RASPOLOŽIVOST MREŽE

Kako svako optičko vlakno prenosi izrazito velike količine podataka, svaki kvar komponente u mreži (npr. prekid kabela, kvar optičkog pojačala, lasera ili fotodetektora) dovodi do

značajnog gubitka podataka, a samim time i prihoda telekom operatora. Najčešći su prekidi kabela ili dijela vlakana u kabele; problem je što, ovisno o mjestu gdje se prekid dogodi, popravak može trajati i do nekoliko dana. Time je osjetno smanjena usluga koju mreža nudi određenoj grupi korisnika.

Osnovni pojmovi koji se spominju u području analize raspoloživosti mreže su raspoloživost, pouzdanost, otpornost, vrijeme do kvara, vrijeme popravka, i vrijeme oporavka. Pretpostvka je da komponenta u svakom trenutku može biti točno u jednom od dva stanja: ispravno ili neispravno. Tada je raspoloživost (availability) komponente, odnosno sustava, vjerojatnost da će komponenta, odnosno sustav, biti u ispravnom stanju u trenutku promatranja. Oznaka za raspoloživost je  $A(t)$  gdje je  $t$  trenutak promatranja. Najčešće se cilja na raspoloživost reda veličine „pet devetki” („five nines”), odnosno 0.99999, što znači da je sustav u neispravnom stanju 5,26 minuta godišnje.

Za razliku od raspoloživosti gdje se promatra samo stanje sustava u trenutku  $t$ , pouzdanost (reliability) je vjerojatnost da je sustav ispravno radio u periodu vremena  $t$ . Otpornost (resilience) mreže je definirana kao sposobnost mreže da pruža usluge i u prisustvu fizičkih kvarova (npr. kvarova mrežnih komponentata ili prekida mrežnih kabela). Ta se sposobnost zasniva na preusmjeravanju mrežnog prometa s oštećenih komunikacijskih puteva na rezervne ili preostale neoštećene puteve. Očito je da to zahtijeva dodatni kapacitet u mreži, bilo u vidu dodatnih puteva ili u vidu dodatnog kapaciteta na postojećim putevima. Iako je uobičajeno radi jednostavnosti mrežne usluge po pitanju raspoloživosti promatrati kao raspoložive ili neraspoločive, često je to nedovoljno precizan model. Naime, postoje i slučajevi degradirane mrežne usluge, pri čemu je usluga dostupna korisniku, ali je pritom smanjene kvalitete. To je vrlo praktično, obzirom da se u mreži dogodio kvar i time je smanjen njen kapacitet te se mora pronaći usluga kojoj će biti dano manje resursa. Kako različiti korisnici imaju različite potrebe po ovom pitanju, najčešće se u SLA definira hoće li korisniku biti omogućeno korištenje usluge u slučaju kvara na mreži operatora.

Često se uz pojam kvalitete usluge pružene korisniku u ovom kontekstu veže i pojam kvalitete zaštite (Quality of Protection, QoP [10]) koji definira stupanj otpornosti svake konekcije ovisno o potrebama korisnika. Takva se zaštita naziva djelomičnom, obzirom da rezervni put nema kapacitet jednak početnom, čime se smanjuje ukupna investicija u infrastrukturu.

Kvarovi mreže definirani su kao slučajni prekidi idealnog rada mreže nastali zbog kvara na komponentama ili kabelima. Kod komponentata pored slučajnih kvarova postoje i oni koji nastaju zbog zamora komponente. Često se kaže da sama mreža nije nikad 100% ispravna ni 100% neispravna [11]. Kvarovi uzrokuju degradaciju ili kompletan prekid signala. Upravljanje kvarovima na optičkoj mreži podrazumijeva prevenciju, raspoznavanje kvara i reakciju na kvar. Prevencija se bavi dizajnom komponentata i planiranjem mreže u smjeru sprječavanja kvarova, raspoznavanje podrazumijeva otkrivanje mjesta i vrste kvara u slučaju njegove pojave, a reakcija ponovnu uspostavu konekcija prethodno narušenih pojavom kvarova.

Raspoloživost je odnos ukupnog vremena bez kvara i ukup-

nog vremena koje se promatra, specifično

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}, \quad (1)$$

pri čemu je MTTF (Mean Time To Failure) srednje vrijeme do kvara, a MTTR (Mean Time To Repair) srednje vrijeme popravka. Ekvivalent formuli (1) je izraz

$$A = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}, \quad (2)$$

gdje je  $\lambda$  intenzitet kvarova (failure rate), a  $\mu$  intenzitet popravaka (repair rate). Mjerna jedinica za intenzitet kvarova je broj kvarova u vremenu (Failure In Time, FIT). Taj broj podrazumijeva vrijeme od  $10^9$  sati obzirom da su mrežne komponente obično vrlo pouzdane. Dakle, 1 FIT znači da komponenta ima u prosjeku 1 kvar u periodu  $10^9$  sati.

Pojam neraspoloživosti (unavailability) koji je komplement pojmu raspoloživosti definira se i koristi zbog pojednostavljenja matematičkih izračuna pouzdanosti sustava koji sadrže veći broj komponenti. Naime, kod promatranja sustava koji se sastoji od niza elemenata povezanih serijski, onda je lakše „zbrojiti neraspoloživosti” komponenata nego „množiti raspoloživosti”. Neraspoloživost je dana sa

$$U = 1 - A \quad (3)$$

Za osiguravanje raspoloživosti mreže koriste se metode zaštite (protection) i obnavljanja (restoration). Metode zaštite i obnavljanja mogu se grupirati u metode zasnovane na vezama (span-oriented) i metode zasnovane na putevima (path-oriented). Kod metoda zasnovanih na vezama obrada kvarova vrši se na krajnjim čvorovima veze; kod metoda zasnovanih na putevima obrada se vrši na krajnjim čvorovima puta u toj mreži.

Metode zaštite koriste statičke unaprijed određene veze ili puteve koji se koriste u slučaju kvara; to osigurava vrlo brz oporavak te je vrijeme obnavljanja kratko i zato su te metode posebno prikladne za usluge s garantiranom raspoloživošću. Za usporedbu, metode obnavljanja trebaju manje zaštitnih kapaciteta, ali pritom se ne može jamčiti uspješan oporavak i može se dogoditi da je vrijeme obnavljanja duže.

Kod usporedbe metoda koriste se dva kriterija:

- vrijeme otkrivanja kvara, koje je vrijeme potrebno da se pronađe mjesto u mreži gdje se kvar dogodio i
- vrijeme obnavljanja, koje je vrijeme potrebno da se mrežni promet na dijelu koji je pogođen kvarom preusmjeri na rezervne puteve.

U ovisnosti o metodi, putevi mogu biti izračunati unaprijed ili se računati nakon što se kvar dogodi.

#### A. Metoda zaštite

Kod metode zaštite rezervni putevi koji se koriste u slučaju kvara su unaprijed izračunati; kada se pojavi kvar mrežni promet jednostavno se preusmjerava na rezervni put bez dodatne obrade i izvođenja algoritama usmjeravanja. Sasvim logično, prednost ove metode u odnosu na metodu obnavljanja je brže izvođenje.

Zaštitne metode mogu se podijeliti u tri podkategorije u ovisnosti o načinu rada:

- zaštita veze,
- zaštita puta i
- $p$ -ciklusi.

Kod zaštite veze i zaštite puta rezervni kapaciteti mogu se koristiti za jedan radni put, odnosno biti namijenjeni (dedicated) ili dijeljeni (shared).

Namijenjeni kapaciteti imaju dva osnovna oblika koji se nazivaju 1+1 i 1:1 zaštita. Kod prvoga prijenos se događa istovremeno i po osnovnoj i po rezervnoj vezi (putu). Određite prima oba i bira signal koji je bolje kvalitete. Ovdje je vrlo jednostavno raspoznati kvar po značajnom odstupanju u kvaliteti između dva signala. U drugom obliku rezervni put se ne koristi dok osnovni put radi ispravno, a nakon pojave kvara koristi se umjesto osnovnog. Zbog toga se u odsustvu kvarova može koristiti za prijenos prometa nižeg prioriteta. Posebno se pazi da su osnovni i rezervni put fizički odmaknuti jer se želi izbjeći situacija u kojoj bi eventualni prekid kabela pogodio istovremeno oba.

Dijeljeni kapaciteti tipa 1:N i M:N omogućavaju da se jedan, odnosno  $M$  rezervnih puteva koristi od strane  $N$  osnovnih. Kao i kod namijenjenih kapaciteta, osnovni i rezervni putevi se fizički odmiču radi sprječavanja istovremenog prekida oba.

Pored ove dvije metode, predložena je metoda zaštite nazvana  $p$ -ciklusi ( $p$ -Cycles) [11]. Ta je metoda kombinacija dviju opisanih metoda; zbog toga  $p$ -ciklusi osiguravaju kraće vrijeme uspostave puteva nakon kvara nego metode zaštite puta, a istovremeno zahtijevaju manje zaštitnih kapaciteta od metoda zaštite veza. Metoda radi tako da čvorove povezuje u zaštitne prstene i time ostvaruje zaštitu veza koje su dio prstena (on-cycle links), ali i veza koje su incidentne sa čvorovima koji su dio prstena, takozvanim razapetim vezama (straddling links).

#### B. Metoda obnavljanja

Kod metode obnavljanja, zaštitni kapaciteti koji će se koristiti traže se nakon pojave kvara u mreži, odnosno po potrebi. Naravno da je neovisno o tome potrebno osigurati dovoljnu količinu kapaciteta da bi algoritam koji vrši traženje mogao to odraditi uspješno. Metoda se zbog toga intenzivno oslanja na upravljački sloj mreže od kojeg traži pronalaženje puta.

Kod nalaženja puteva razlikujemo centralizirani i distribuirani pristup. Kod centraliziranog pristupa upravljanje mrežom obavlja se iz određenog centralnog čvora, koji izračunava zaštitne puteve na temelju podataka o topologiji koje dobiva od preostalih čvorova i zatim im šalje informacije o putevima. Kod distribuiranog pristupa izvorišni i odredišni čvor puta na kojem se dogodio kvar traže odgovarajuće zaštitne puteve razmjenom upravljačkih informacija s ostalim čvorovima u mreži.

Metoda zaštite i metoda obnavljanja nude određene prednosti i nedostatke. Kod metode zaštite zaštitni kapaciteti proračunati su unaprijed i ne proračunavaju se nakon kvara; to rezultira bržim odgovorom na kvar, ali u slučaju kvara na rezervnim kapacitetima nedostatak mogućnosti dodatnih proračunavanja puta uzrokuje neraspoloživost pružene usluge korisniku. Kod metode obnavljanja zaštitni kapaciteti se računaju

nakon pojave kvara na primarnom putu; to rezultira sporijim proračunom rezervnog puta i time sporijim odgovorom na kvar, ali se može reagirati na kvar rezervnog puta u slučaju da postoje dodatni kapaciteti koji to omogućuju. Metoda koja nakon pojave kvara mrežni promet preusmjerava na najkraći preostali put s dovoljnim kapacitetom koji spaja izvorišni i odredišni čvor naziva se metodom najkraćeg puta nakon kvara (Shortest Path After Failure, SPAF). Naravno, za vrijeme dok nema kvarova, kao i kod metode zaštite dodatni kapaciteti mogu se koristiti za prijenos prometa nižeg prioriteta.

Izračunavanje dodatnih puteva nakon pojave kvara, pored povećanja vremena obnavljanja, zahtijeva i ugradnju algoritama za pronalaženje puteva u upravljački sustav mreže. Druga je mogućnost koristiti prethodno izračunate zaštitne puteve. Za razliku od metode zaštite, ovdje se koristi više njih te se time izbjegava barem dio situacija u kojim drugi kvar pogađa zaštitni put koji je aktiviran nakon prvog kvara.

#### IV. VIŠESTRUKI KVAROVI

Današnje transmisijske mreže većinom su projektirane tako da osiguravaju preživljavanje u slučaju jednostrukih kvarova. Obzirom da razvojem društva raste veličina mreža, višestruki kvarovi (multiple failures) imaju veću mogućnost pojavljivanja. Potrebno je razlikovati nezavisne (independent) od zavisnih kvarova (dependent failures). Razmatrajući samo prekide kabela, s desecima tisuća kilometara kabela u upotrebi, godišnje se može očekivati nekoliko vremenskih intervala u kojima se nezavisno dogodi prekid drugog kabela za vrijeme dok prvi još nije popravljen. Pored toga, može se dogoditi zavisni kvar gdje jedan vanjski utjecaj rezultira kvarom više elemenata mreže. Dvije najčešće vrste zavisnih kvarova su

- brze rute koje zaobilaze čvor (express route nodal bypass), kod kojih neka od vlakna zaobilaze komutacijske elemente čvora, ali dijele kabel s vlaknima koja ne zaobilaze čvor i
- skupine veza s dijeljenim rizikom (shared risk link groups), koji nastaju u slučaju da različiti kabeli na nekom dijelu (primjerice prijelazu mosta) dijele isti fizički put, te se u većini slučajeva prekid oba kabela događa zajedno.

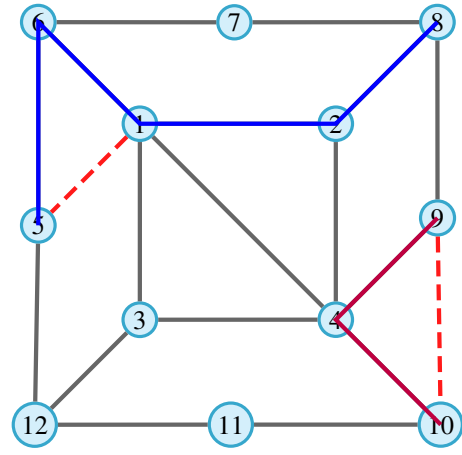
Naravno da nije cilj dizajnirati mrežu koja će izdržati svaki dvostruki kvar; to bi zahtijevalo mnogo dodatnog kapaciteta i da povezanost mreže između svaka dva čvora bude 3 ili veća<sup>1</sup>. Cilj je dizajnirati mrežu koja će pored svih jednostrukih moći preživjeti neke od mogućih dvostrukih kvarova, specifično one gdje je investicija u smislu potrebnog dodatnog kapaciteta isplativa [12].

Za jednostruki kvar definirana je obnovljivost u slučaju kvara jedne veze (single span failure restorability) za vezu  $i$  formulom

$$R_1(i) := 1 - \frac{N(i)}{w_i}, \quad (4)$$

pri čemu je  $N(i) = w_i - \min\{w_i, k_i\}$  ukupan broj neobnovljivih kanala u slučaju kvara veze  $i$ ,  $w_i$  ukupan broj kanala te veze, a  $k_i$  broj kanala koji se koriste za obnavljanje u

<sup>1</sup>Povezanost između dva čvora definirana je kao broj nezavisnih putova između ta čvora.



Slika 1. Prostorno neovisan dvostruki kvar.

slučaju kvara te veze. Analogno tome, za dvostruke kvarove obnovljivost u slučaju kvara dvije veze (dual span failure restorability) definira se za veze  $i$  i  $j$  kao

$$R_2(i, j) := 1 - \frac{N(i, j)}{w_i + w_j}, \quad (5)$$

pri čemu je  $N(i, j) = N_i + N_j$  ukupan broj neobnovljivih kanala u slučaju kvara veza  $i$  i  $j$ , a  $w_i$  i  $w_j$  ukupan broj kanala na vezama  $i$  i  $j$  respektivno. Obnovljivost mreže u slučaju kvara dvije veze definirana je kao težinski prosjek

$$R_2 := \frac{\sum_{(i,j) \in S^2, i \neq j} (w_i + w_j) \cdot R_2(i, j)}{\sum_{(i,j) \in S^2, i \neq j} (w_i + w_j)} \quad (6)$$

pri čemu je  $S$  skup svih veza mreže. Aritmetičkim operacijama formula se može pojednostaviti [11] do

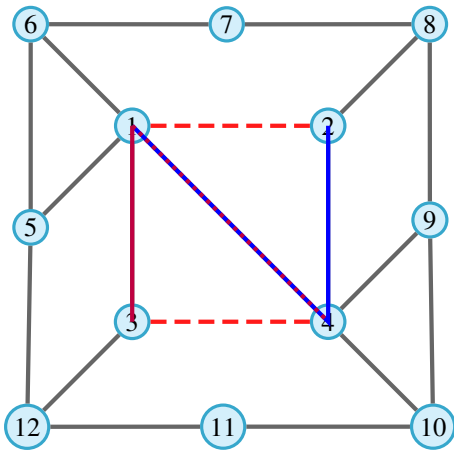
$$R_2 = 1 - \frac{\sum_{(i,j) \in S^2, i \neq j} N(i, j)}{2 \cdot (|S| - 1) \cdot \sum_{i \in S} w_i} \quad (7)$$

##### A. Klasifikacija dvostrukih kvarova

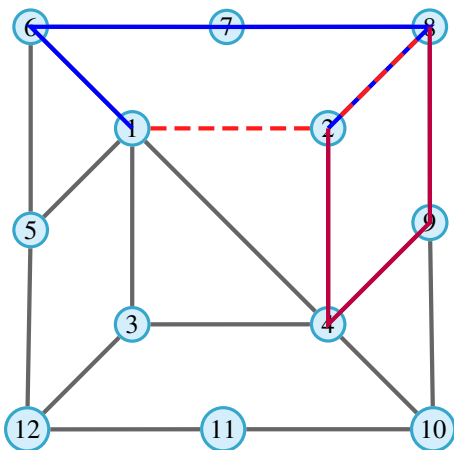
Razlikujemo 4 osnovne vrste dvostrukih kvarova:

- prostorno neovisni kvarovi, kod kojih su putevi koji se koriste u obnavljanju disjunktne (slika 1),
- kvarovi kod kojih putevi imaju zajedničke elemente i u ovisnosti o potrebama mogu se natjecati za rezervni kapacitet (slika 2),
- situacija kada drugi kvar pogađa jedan ili više puteva za obnavljanje prvog kvara (slika 3) te
- situacija u kojoj dva kvara izoliraju čvor stupnja 2 ili čine rez na grafu i dijele ga u dvije komponente povezanosti (slika 4).

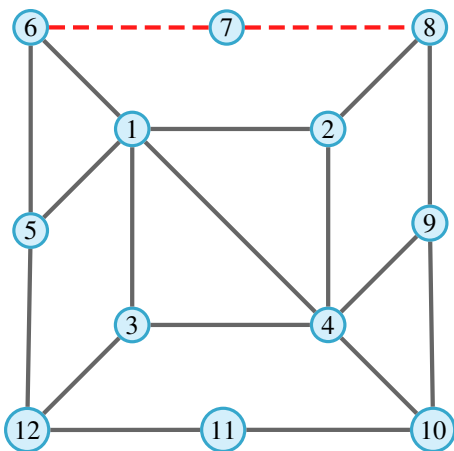
Usporedba metode zaštite, metode obnavljanja i kombinirane metode zaštite i obnavljanja (prvi kvar metoda zaštite, drugi kvar metoda obnavljanja) u prisustvu dvostrukih kvarova govori u prilog metode obnavljanja [13] [14]. Kombinirana metoda daje slične rezultate kao metoda obnavljanja, osim kada drugi kvar pogađa zaštitne puteve prvog kvara.



Slika 2. Dvostruki kvar kod kojeg postoji natjecanje za rezervni kapacitet.



Slika 3. Dvostruki kvar kod kojeg drugi kvar pogađa rezervne puteve prvog.



Slika 4. Dvostruki kvar koji izolira čvor stupnja 2.

### B. Odnos obnovljivosti i raspoloživosti

Ukoliko pretpostavimo da čvorovi imaju idealnu raspoloživost, tada put  $P$  ima raspoloživost

$$A_P = \prod_{i \in P} A_i = 1 - \sum_{i \in P} U_i \quad (8)$$

odnosno nerasploživost

$$U_P = \sum_{i \in P} U_i = \sum_{i \in P} U_i^{phy} \quad (9)$$

pri čemu su  $A_i$  i  $U_i = U_i^{phy}$  raspoloživost i nerasploživost veze  $i$  koja je dio tog puta. Razmišljamo li u terminima metode obnavljanja puta, mreža može ponuditi alternativni put, odnosno:

$$U_P = \sum_{i \in P} U_i^* \quad (10)$$

pri čemu je  $U_i^*$  nerasploživost osnovne fizičke veze i rezervnih puteva i ona iznosi

$$U_i^* = U_i^{phy} \cdot \sum_{j \in S, i \neq j} U_j^{phy} \cdot (1 - R_2(i, j)). \quad (11)$$

pri čemu je  $S$  skup svih veza u mreži. Ukoliko pretpostavimo da sve veze imaju istu nerasploživost  $U_s$ , uvrštavanjem (11) u (10) i sređivanjem dobivamo prosječnu raspoloživost puta:

$$U^* = (S - 1) \cdot U_s^2 \cdot (1 - R_2) \quad (12)$$

### C. Ostali višestruki kvarovi

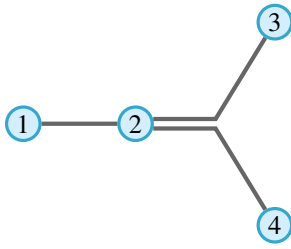
Naposlijetku, može se postaviti pitanje trostrukih i ostalih višestrukih kvarova; međutim, pored činjenice da su oni mnogo rjeđi od dvostrukih, većina metoda koje se koriste u zaštiti mreže od dvostrukih kvarova može se generalizirati na ostale višestruke.

## V. ZAVISNOST KVAROVA I SKUPINE VEZA S DIJELJENIM RIZIKOM

Zavisnost kvarova definiramo kao situaciju u kojoj kvar jedne komponente u mreži utječe na kvar druge komponente. Pritom zavisnost može biti potpuna (odnosno kvar jedne komponente implicira i kvar druge) ili djelomična (kvar jedne komponente implicira kvar komponente s određenom vjerojatnosti koja nije trivijalna). Trivijalan slučaj odnosi se na nezavisne kvarove.

Skupina veza s dijeljenim rizikom (shared-risk link group, SRLG) je situacija u kojoj jedan fizički prekid implicira više logičkih kvarova, odnosno kvar na više od jedne veze. Najčešći uzrok tome je što dva kabela istim fizičkim putem izlaze iz čvora ili istim putem prelaze preko nekog objekta fizičkog svijeta (npr. mosta) gdje je bilo nepraktično postavljanje kabela izvesti drugačije.

U analizi SRLG-i se dijele na koincidentne (coincident) i nekoincidentne (non-coincident). Koincidentni SRLG-i su oni koji imaju zajednički čvor i u praksi su znatno češći; oni koji nemaju su nekoincidentni. SRLG-i općenito utječu negativno na dostupan kapacitet mreže u prisustvu kvarova, bez obzira na



Slika 5. Primjer SRLG-a kod zajedničkog izlaza iz čvora.

korištenje metode zaštite i obnavljanja. Pritom treba naglasiti da su koincidentni SRLG-i znatno češći i zbog toga značajniji od svih drugih dvostrukih kvarova. [15].

Utjecaj SRLG-a na metodu  $p$ -ciklusa analiziran je i predložena su poboljšanja te metode koja omogućuju optimalniji dizajn ciklusa [16].

## VI. METODE PROCJENE I IZRAČUNA RASPOLOŽIVOSTI

Sve dosad opisane metode proračuna spadaju pod analitičke, jer daju točno rješenje. Međutim, u nekim problemima složenost proračuna raste prebrzo u ovisnosti o veličini problema što čini analitičke metode neupotrebljivima, pa se umjesto njih koriste heurističke ili simulacijske metode.

Zavisnost dva elementa modelira se analitički pomoću uvjetne vjerojatnosti

$$\Pr(A \cap B) = \Pr(A) \cdot \Pr(B|A) \quad (13)$$

pri čemu je  $\Pr(B|A)$  vjerojatnost da se dogodi događaj  $B$  kada se  $A$  već dogodio. U slučaju potpune zavisnosti formula (13) postaje

$$\Pr(A \cap B) = \Pr(A) \quad (14)$$

dok je nezavisan slučaj oblika

$$\Pr(A \cap B) = \Pr(A) \cdot \Pr(B). \quad (15)$$

Opći slučaj djelomične zavisnosti ilustrira složenost analitičkog postupka, te je potrebno problemu pristupiti drugačije.

Općenito za izračun raspoloživosti može se pored analitičkih metoda koristiti Monte Carlo simulacija [17] [4]. Monte Carlo simulacija za izračun raspoloživosti zasniva se na opetovanom uzorkovanju slučajnih brojeva prema određenoj vjerojatnosnoj distribuciji, a ti slučajni brojevi predstavljaju vremena do kvara i vremena popravka nakon kvara svakog elementa neke mreže. Na temelju tih vremena moguće je odrediti udio vremena u kojem je mreža bila raspoloživa.

Kako bi se ta metoda mogla primijeniti na analizu zavisnih kvarova, potrebno je kvar jednog elementa koji se događa u slučaju kvara drugog razmatrati kao jedan događaj kvara. Kada su određene ili procijenjene međusobne zavisnosti elemenata mreže, ti podaci su ulazni parametri simulacije. Zatim svaki događaj kvara koji uključuje element koji ima barem jednu netrivialnu zavisnost rezultira dodatnim korakom generiranja slučajnog broja za svaku od netrivialnih zavisnosti. Vrijednost slučajnog broja određuje hoće li događaj kvara elementa rezultirati kvarom elemenata s kojima postoji odnos zavisnosti.

## VII. PROGRAMSKA PODRŠKA

Razmotrena je mogućnost razvoja vlastitog alata za simulaciju kvarova, po uzoru na COSMOS [18]. U tom slučaju cilj bi bio vršiti simulaciju slojeva od mrežnog na niže. Međutim, s ciljem da se otvori mogućnost prema potencijalno zanimljivom istraživanju utjecaja korištenja različitih metoda zaštite i obnavljanja na više slojeve, odlučeno je da će se implementirati modele u neki od postojećih simulatora mreža otvorenog koda.

Vlasnički (proprietary) simulatori nisu razmatrani zbog ograničenja mogućnosti korištenja i proširivanja dodatnim modelima te same cijene. Među danas dostupnim simulatorima otvorenog koda (open source) detaljnije su analizirani prednosti i nedostaci simulatora ns-2 [19], OMNeT++ [20] i ns-3 [21] [22].

Novčana podrška razvoju mrežnog simulatora ns-2 značajno je opala početkom prošlog desetljeća, što je rezultiralo smanjenom integracijom dodatnih modela razvijenih od strane istraživača u sam simulator. Danas se veći broj međusobno nekompatibilnih (i time neusporedivih) modela može pronaći na internetu, od kojih dio ovisi i o značajkama specifične verzije ns-2 i zbog toga nije realno očekivati da će vremenom integracija postati moguća.

Pored navedenog, ns-2 ima još nekoliko ograničenja u dizajnu od kojih se ističu [23]:

- razdvojeni model objekata (OTcl i C++),
- velika količina apstrakcije slojeva od mrežnog prema dolje otežava povezivanje simulacije i stvarnosti,
- nedostatak pomoćnih alata za simulaciju, primjerice, alata za raspoznavanje stabilnog stanja simulacije,
- nedostatak provjere modela i
- nedostatak dokumentacije.

Iako ns-2 nije razmatran za korištenje i doradu upravo zbog navedenih nedostataka i očekivanja da će znanstvena zajednica u idućih nekoliko godina većim dijelom prijeći na ns-3, vrijedi spomenuti varijantu OWns [24] [6] koja implementira model WDM mreže. OWns se više ne razvija i izvorni kod više nije dostupan za preuzimanje sa stranica alata<sup>2</sup>.

Kriterij odabira, pored podržanih modela optičke transportne mreže i raspoloživosti, bio je i arhitektura simulatora i njegove performanse. Za OMNeT++ postoji razvijen model pasivne optičke mreže [25]. Međutim, obzirom da se radi o modelu pristupne mreže, a cilj je razmatrati zavisne kvarove prvenstveno jezgrene mreže, ovaj model nije prikladan. Pored toga, OMNeT++ ima neke od mana mrežnog simulatora ns-2: model komponenata je sličan [26], arhitektura je dvojezična (koristi se NED i C++) i vezan je za vlastiti IDE koji je implementiran kao dodatak za Eclipse. Pored svega, OMNeT++ koristi akademsku javnu licencu (Academic Public License, APL) koja onemogućuje komercijalnu primjenu. To se može smatrati značajnim ograničenjem jer eliminira tvrtke koje potencijalno mogu biti zainteresirane za daljnji razvoj rješenja koje je u nastavku rada predloženo.

<sup>2</sup><http://www.eecs.wsu.edu/~dawn/software/owns.html> ima poveznicu na arhivu koja sadrži izvorni kod verzije 0.9, ali poveznica daje samo stranicu s greškom „The page cannot be displayed“ (stanje u siječnju 2012.)

Iako među tri navedena simulatora ns-3 ostvaruje u prosjeku najbolje performanse [27], razlika nije naročito velika.

Na samom početku razvoja simulatora ns-3 odlučeno da će biti dizajniran i napisan ispočetka. Nedostaci simulatora ns-2 posljedica su dizajna te ih nije moguće ispraviti i istovremeno zadržati kompatibilnost s postojećom jezgrom simulatora i već razvijenim modelima. Tijekom razvoja simulatora ns-3 ideje i dijelovi koda preuzeti su iz simulatora GTNetS, yans [28] i ns-2. Razvoj su novčano podupirali francuski Nacionalni institut za istraživanje računarske znanosti i upravljanja (Institut national de recherche en informatique et en automatique, INRIA) i američka Nacionalna zaklada za znanost (National Science Foundation, NSF). Cilj projekta bio je stvoriti alat koji će se nastaviti razvijati od strane akademske zajednice i zainteresiranih tvrtki i nakon što prestane početno financiranje. Mnogo je uloženo u stvaranje zajednice održavatelja (maintainers), tj. ljudi od kojih svatko održava određeni dio koda simulatora. Postavljena je infrastruktura u kojoj se svaka zainteresirana osoba može pridružiti razvoju, bilo dorodom postojećih modela, bilo stvaranjem novih [29]. Čitav kod simulatora ns-3 dostupan je pod licencom GPLv2.

Mrežni simulator ns-3 zasnovan je na diskretnim događajima. Simulirano vrijeme reprezentirano je korištenjem cjelobrojnog (integer) tipa kako bi se izbjegli problemi s prenosiivosti na različite procesorske arhitekture i operacijske sustave [26]. Ukupna veličina tipa podatka koji reprezentira vremenski trenutak je 128 bita; 64 bita koristi se za cjelobrojni dio, a 64 bita za necjelobrojni, što omogućuje simuliranje 584 godine s nanosekundnom preciznosti. Sve operacije potrebne za taj tip podataka (zbrajanje, oduzimanje, množenje, dijeljenje, uspoređivanje) implementirane su korištenjem isključivo operacija na primitivnim cjelobrojnim tipovima podataka.

Mrežni simulator ns-3 sadrži generator pseudoslučajnih brojeva MRG32k3a [30]. MRG32k3a generator nudi  $1.8 \cdot 10^{19}$  nezavisnih nizova slučajnih brojeva, od kojih se svaki sastoji od  $2.3 \cdot 10^{15}$  podnizova. Svaki podniz ima period  $7.6 \cdot 10^{22}$ . Period čitavog generatora je  $3.1 \cdot 10^{57}$ . Omogućeno je korištenje i drugih generatora slučajnih brojeva, te će u slučaju nedostatnosti ovoga biti korišten Mersenneov uvijač (Mersenne twister) [31] čiji ukupni period iznosi  $2^{19937} - 1$ .

Simulator se izvodi u jednoj procesnoj niti. Tijekom razvoja analizirana je mogućnost implementacije višenitnog (multithreaded) izvođenja, ali zbog činjenice da se koriste pametni pokazivači (smart pointers) za automatsko upravljanje memorijom (automatic garbage collection), višenitna varijanta radi sporije od jednonitne [32]. Međutim, kako je kod analize raspoloživosti potrebno izvesti velik broj simulacija, ovo nije problem jer je moguće izvoditi više neovisnih simulacija paralelno.

Mrežni simulator ns-3 je C++ biblioteka koja se može prevesti pomoću prevoditelja GCC na operacijskim sustavima Linux, FreeBSD i Mac OS X te na operacijskom sustavu Windows uz korištenje okoline Cygwin; simulacijski programi su izvršne C++ datoteke. Moguće je korištenje Python pridruživanja kod pisanja simulacija, što olakšava pisanje prototipa modela i omogućuje izravno kombiniranje ns-3 simulacija s istraživačkim softverom napisanim u Pythonu (primjerice, NumPy, SciPy, matplotlib ili Sage).

Trenutno ne postoji model komponenata optičke transportne mreže za simulator ns-3. Zbog činjenice da nijedan od postojećih modela u drugim simulatorima nije adekvatan i fleksibilne arhitekture mrežnog simulatora ns-3 odlučeno je da se razvije vlastiti model optičke mreže, a zatim i model kvarova komponenata mreže u mrežnom simulatoru ns-3. Naravno da će koncepti već razrađenih modela za preostala dva simulatora opisani u navedenim radovima poslužiti kao smjernica kod implementacije vlastitog rješenja.

U sklopu projekta ResumeNet<sup>3</sup> završenog u kolovozu 2011. za analizu raspoloživosti nadograđen je mrežni simulator ns-3 [33] [5]. Implementacija modela raspoloživosti razvijena u sklopu navedenih radova koncipirana na način da u slučaju kvara na vezi zaustavlja rad mrežnog sloja na oba sučelja spojena na tu vezu, što je vrlo jednostavno ali i nerealistično rješenje. Još veći je problem što se u konkretnom slučaju zaustavlja specifično IPv4 pa se model ne može iskoristiti u slučaju da čvorovi koriste IPv6 ili vrše slanje na nižem sloju i uopće ne koriste ili nemaju IP sloj. S druge strane, okvir za specifikaciju topologije i kvarova potencijalno je iskoristiv uz određene prilagodbe.

## VIII. POTENCIJALNI SMJEROVI ISTRAŽIVANJA

Neki od problema vezani uz zavisne kvarove koji se mogu razmatrati su:

- simulacijske i/ili heurističke metode proračuna obnovljivosti dane mreže,
- simulacijske metode za izračun raspoloživosti uzimajući u obzir zavisnosti i kapacitete veza,
- heuristički algoritmi za usmjeravanje u prisustvu dvostrukih kvarova,
- katastrofalni kvarovi koji zahvaćaju određeno područje i
- modeliranje zavisnosti kvarova komponenata unutar čvorova.

## IX. ZAKLJUČAK

Povećanjem količine prometa koju mreža prenosi u jedinici vremena, zaštita prijenosnih kapaciteta mreže postaje važnija. Zbog toga su razvijene metode zaštite koje u slučaju kvarova koriste unaprijed ili dinamički određene rezervne veze ili puteve.

Iako se većina mreža planira tako da izdrži jednostruke kvarove, zbog veličine današnjih mreža s jedne strane i zbog moguće zavisnosti kvarova s druge dvostruki kvarovi postaju stvaran problem. Zavisni kvarovi predstavljaju najveći udio od svih dvostrukih kvarova.

Zbog složenosti analitičkih proračuna u prisustvu zavisnosti kvarova potrebno je koristiti simulacijske metode. Moderni simulatori mreža, primjer kojih je ns-3, dovoljno su fleksibilni

<sup>3</sup>Resilience and Survivability for Future Networking (ResumeNet) je kolaboracija između The University of Kansas (KU), Lancaster University, ETH Zürich, Technische Universität München (TUM), Technische Universiteit Delft, Université de Liège (ULg), Universität Passau, Uppsala Universitet (UU), NEC Laboratories Heidelberg i France Telecom – Orange Labs. ResumeNet istražuje okvir, mehanizme i eksperimentalnu evaluaciju elastičnosti (resilience) i preživljavanja u prisustvu kvarova (survivability in presence of failures) za umrežavanje budućnosti pod financijskim pokroviteljstvom EU Future Internet Research & Experimentation (FIRE) iz sedmog okvirnog programa (Seventh Framework Programme, FP7).



da je moguće izvršiti implementaciju modela optičke mreže i modela kvarova koji će zatim interagirati sa višim slojevima i simuliranim prometom.

To će omogućiti istraživanje u smjeru razvoja metode za proračun raspoloživosti u prisustvu zavisnosti kvarova veza ili komponenata unutar čvorova i eventualno katastrofalnih kvarova, što će zasigurno otvoriti još mnoga pitanja.

#### LITERATURA

- [1] A. Odlyzko, "Internet traffic growth: Sources and implications," in *Proc. SPIE*, vol. 5247, 2003, pp. 1–15.
- [2] HAKOM – Hrvatska agencija za poštu i elektroničke komunikacije. (2010) Porast tržišta elektroničkih komunikacija u republici hrvatskoj u 2010. godini. [Online]. Available: <http://www.hakom.hr/default.aspx?ID=787>
- [3] D. Crawford, "Fiber optic cable dig-ups: Causes and cures," *Proc. Network Reliability: A Report to the Nation—Compendium of Technical Papers, National Engineering Consortium*, 1993.
- [4] O. Lapčević, M. Lacković, and B. Mikac, "Impact of dependent failures on the availability of the optical network," in *CNSDSP 2008. 6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, 2008. IEEE, 2008, pp. 423–427.
- [5] E. Çetinkaya, D. Broyles, A. Dandekar, S. Srinivasan, and J. Sterbenz, "Modelling communication network challenges for future internet resilience, survivability, and disruption tolerance: A simulation-based approach," *Telecommunication Systems*, pp. 1–16, 2011.
- [6] B. Wen, N. Bhide, R. Shenai, and K. Sivalingam, "Optical wavelength division multiplexing (WDM) network simulator (OWns): architecture and performance studies," *SPIE Optical Networks Magazine*, pp. 16–26, 2001.
- [7] E. Mannie, "Generalized multi-protocol label switching (GMPLS) architecture," *Interface*, vol. 501, p. 19, 2004.
- [8] M. O'Mahony, C. Politi, D. Klonidis, R. Nejabati, and D. Simeonidou, "Future optical networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 12, pp. 4684–4696, 2006.
- [9] F. An, D. Gutierrez, K. Kim, J. Lee, and L. Kazovsky, "SUCCESS-HPON: A next-generation optical access architecture for smooth migration from TDM-PON to WDM-PON," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 43, no. 11, pp. S40–S47, 2005.
- [10] O. Gerstel and G. Sasaki, "Quality of protection (qop): A quantitative unifying paradigm to protection service grades," *Optical Networks Magazine*, vol. 3, no. 3, pp. 40–49, 2002.
- [11] W. Grover, *Mesh-based survivable networks: options and strategies for optical, MPLS, SONET, and ATM Networking*. prentice hall, 2004.
- [12] M. Clouqueur and W. Grover, "Mesh-restorable networks with complete dual failure restorability and with selectively enhanced dual-failure restorability properties," in *Optical Networking and Communications Conference (OptiComm 2002)*. Citeseer, 2002, pp. 1–12.
- [13] —, "Computational and design studies on the unavailability of mesh-restorable networks," in *Proceedings of the 2nd International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN 2000)*, 2000, pp. 181–186.
- [14] —, "Availability analysis of span-restorable mesh networks," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 20, no. 4, pp. 810–821, 2002.
- [15] J. Doucette and W. Grover, "Capacity design studies of span-restorable mesh transport networks with shared-risk link group (srlg) effects," in *SPIE Opticomm*. Citeseer, 2002.
- [16] C. Liu and L. Ruan, "p-cycle design in survivable wdm networks with shared risk link groups (srlgs)," *Photonic Network Communications*, vol. 11, no. 3, pp. 301–311, 2006.
- [17] M. Lacković and B. Mikac, "Analytical vs. simulation approach to availability calculation of circuit switched optical transmission network," in *ConTEL 2003. Proceedings of the 7th International Conference on Telecommunications, 2003.*, vol. 2. IEEE, 2003, pp. 743–750.
- [18] M. Lacković, R. Inkret, and B. Mikac, "An approach to an IP over WDM transmission network modelling," in *Proceedings of the 2002 4th International Conference on Transparent Optical Networks, 2002.*, vol. 1. IEEE, 2002, pp. 82–85.
- [19] S. McCanne, S. Floyd, and K. Fall, "The lbnl network simulator," *Software on-line: <http://www.isi.edu/nsnam>*, 1997.
- [20] A. Varga et al., "The OMNeT++ discrete event simulation system," in *Proceedings of the European Simulation Multiconference (ESM'2001)*, vol. 9, 2001.
- [21] T. Henderson, M. Lacage, G. Riley, C. Dowell, and J. Kopena, "Network simulations with the ns-3 simulator," *SIGCOMM demonstration*, 2008.
- [22] ns 3 Project, *ns-3 Manual, version 3.13*. [Online]. Available: <http://www.nsnam.org/docs/release/3.13/manual/singlehtml/index.html>
- [23] M. Lacage, "Network experimentation and simulation with ns-3," in *Trilogy Future Internet Summer School*. Trilogy consortium, 2009.
- [24] N. Bhide and K. Sivalingam, "Design of OWns: optical wavelength division multiplexing (WDM) network simulator," in *proceedings of First SPIE Optical Networking Workshop*. Citeseer, 2000.
- [25] K. Kim, "Integration of OMNeT++ hybrid TDM/WDM-PON models into INET framework," in *OMNeT++ Workshop*, 2011.
- [26] M. Lacage, "Experimentation tools for networking research," Ph.D. dissertation, Ecole doctorale Stic, Université de Nice Sophia Antipolis, 2010.
- [27] E. Weingartner, H. Vom Lehn, and K. Wehrle, "A performance comparison of recent network simulators," in *ICC'09. IEEE International Conference on Communications, 2009*. IEEE, 2009, pp. 1–5.
- [28] M. Lacage and T. Henderson, "Yet another network simulator," in *Proceeding from the 2006 workshop on ns-2: the IP network simulator*. ACM, 2006, p. 12.
- [29] ns 3 Project, *ns-3 Model Library, version 3.13*. [Online]. Available: <http://www.nsnam.org/docs/release/3.13/models/singlehtml/index.html>
- [30] P. L'Ecuyer, R. Simard, E. Chen, and W. Kelton, "An object-oriented random-number package with many long streams and substreams," *Operations Research*, pp. 1073–1075, 2002.
- [31] M. Matsumoto and T. Nishimura, "Mersenne twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator," *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TO-MACS)*, vol. 8, no. 1, pp. 3–30, 1998.
- [32] G. Seguin, "Multi-core parallelism for ns-3 simulator," *INRIA Sophia-Antipolis, Tech. Rep*, 2009.
- [33] E. Çetinkaya, D. Broyles, A. Dandekar, S. Srinivasan, and J. Sterbenz, "A comprehensive framework to simulate network attacks and challenges," in *(ICUMT), 2010 International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops*. IEEE, 2010, pp. 538–544.