

ISKUSTVA U EDUKACIJI I ISTRAŽIVANJU IP MREŽA METODOM SIMULACIJE

Mirjana Stojanović^{1,2}, Slavica Boštjančič Rakas¹, Valentina Timčenko¹

¹Institut Mihajlo Pupin, Beograd, ²Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu

Sadržaj: U prvom delu rada objašnjeni su principi konstruisanja modela i scenarija simulacije mreža sa tehnologijom Internet protokola (IP). Sledi pregled osnovnih karakteristika četiri poznata simulatora IP mreža: OPNET Modeler, SSFNet, J-Sim i Network Simulator ver. 2 (NS2). Iskustva u istraživanju zasnovana su na korišćenju simulatora NS2 i usmerena na mehanizme kvaliteta servisa i optimizaciju performansi operativne mreže. U toku je i istraživanje koje ima za cilj komparativnu analizu performansi simulatora NS2 u okruženjima operativnih sistema Windows i Linux. Iskustva u primeni simulacije u edukaciji obuhvataju konsultativni rad sa studentima na izradi diplomskih, magistarskih i master radova, kao i iskustva u nastavi na Saobraćajnom i Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Ključne reči: Internet protokol, Simulator mreže, Scenario simulacije, Analiza zapisa.

1. Uvod

Istraživanja u oblasti mreža sa tehnologijom Internet protokola (IP) zasnivaju se na analitičkim metodima, simulaciji, eksperimentima i merenjima. Dok merenja i eksperimenti obezbeđuju sredstva za ispitivanje realnih mreža, simulacija i analiza su ograničene na ispitivanje konstruisanih, apstraktnih modela. Ograničenje metoda merenja i eksperimentalnih metoda je u tome što se oni mogu primenjivati samo na postojeći sistem ili delimično nova okruženja. Sa druge strane, iako su analitički metodi ključni za suštinsko razumevanje ponašanja mreže, postoji rizik primene toliko pojednostavljenih modela da se gube bitne karakteristike ponašanja mreže.

Simulacija je komplementarna sa analizom, zbog toga što omogućava verifikaciju ispravnosti analize i ispitivanje kompleksnih modela koje bi bilo teško ili nemoguće rešavati analitički. Usled heterogenosti i brzih promena IP tehnologije, ne postoji jedinstven i ograničen skup scenarija simulacije, dovoljan da pokaže da će se predloženi protokol ili projektovani sistem dobro ponašati u uslovima stalnog razvoja mreže. Umesto toga, simulacije imaju bitnu ulogu u ispitivanju različitih aspekata predloženog rešenja i razumevanju dinamičkog ponašanja mreže.

Pored problema da se definiše relevantan model, mogu se javiti teškoće u verifikaciji da simulator tačno implementira željeni model. Zbog toga je preporučljivo koristiti poznate i proverene alate, a jedan od najboljih načina rešavanja problema verifikacije rezultata simulacije je da simulatori i pridruženi skriptovi budu slobodno dostupni, tako da drugi istraživači mogu sami lako da provere efekte promene polaznih pretpostavki o mrežnom scenariju.

2. Principi konstruisanja simulacionih modela i scenarija simulacije

Ključno svojstvo koje generalno otežava modelovanje i simulaciju IP mreža je heterogenost [1], koja se ogleda u više aspekata: topologija mreže, izbor simuliranih aplikacija, generisanje saobraćaja, dinamičko rutiranje saobraćaja, razlike u verzijama protokola i dr. To znači da ne postoji unapred definisan skup scenarija simulacije koji je dovoljan da verifikuje predložena rešenja. Problem se delimično prevazilazi identifikacijom invarijantnih svojstava za karakteristike IP saobraćaja, proces dolazaka poziva, trajanje sesija, kao i pravilnim aproksimacijama modela i ispitivanjem ponašanja mreže u uslovima promene skupa simulacionih parametara u širokom opsegu.

2.1 Topologija mreže

Topologija mreže je definisana čvorovima mreže koji su međusobno povezani linkovima. Čvorovi se najčešće modeliraju kao generički paketski komutatori, koji u zavisnosti od primenjene tehnologije i scenarija simulacije mogu imati specifične karakteristike (npr. čvor jezgra, periferni čvor, mobilni čvor). Sledeće bitno svojstvo je modeliranje mehanizama opsluživanja dolaznog i odlaznog saobraćaja. Takođe se modelira funkcija rutiranja saobraćaja – algoritmi i protokoli.

Model linka obavezno obuhvata parametre fizičkog linka kao što su kapacitet i vreme propagacije, a može da obuhvati i parametre protokola koji se primenjuje na sloju linka za podatke, kao i parametre koji su relevantni za ukupne performanse mreže (cena, verovatnoća greške po bitu, srednje vreme između otkaza i dr.).

2.2 Izvori saobraćaja

Pravilno definisanje izvora (generatora) saobraćaja je jedna od ključnih tačaka u konstruisanju simulacionih modela, jer se pomoću izvora simuliraju profili ulaznog saobraćaja u smislu zahtevanog propusnog opsega i prirode saobraćaja. Iako u modeliranju izvora postoji određen broj invarijanti, ostaje otvoren problem definisanja većih scenarija simulacije sa realističnim kombinacijama saobraćaja. Matematički modeli saobraćaja mogu se najopštije klasifikovati na stacionarne i nestacionarne. Stacionarni modeli obuhvataju modele sa kratkoročnim i dugoročnim korelacijama.

Najpoznatiji modeli sa kratkoročnim korelacijama su Markovljevi i regresivni modeli. U Markovljeve modele ubrajaju se On/Off modeli, Poasonovi procesi sa Markovljevom modulacijom (*Markov Modulated Poisson Process*, MMPP) i fluidni modeli sa Markovljevom modulacijom (*Markov Modulated Fluid Model*). On/Off modeli se tipično koriste za modelovanje izvora govora. MMPP se može koristiti za modelovanje kombinovanih izvora govora i podataka. Fluidni modeli mogu se koristiti za modelovanje saobraćaja sa promenljivim bitskim protokom (*Variable Bit Rate*, VBR).

Poznati regresivni modeli saobraćaja su autoregresivni modeli kao što su ARMA (*AutoRegressive Moving Average*) i ARIMA (*AutoRegressive Integrated Moving Average*). ARMA može da se koristi za modeliranje VBR saobraćaja, dok se ARIMA koristi za modeliranje agregatnog Internet saobraćaja ili specifičnih servisa i odgovarajućih protokola (Web i http).

Dugoročne korelacije u dolascima paketa koje su uočene u agregatnom Internet saobraćaju dobro se opisuju pomoću samo-sličnih (fraktalnih) procesa. Termin "dugoročan" označava intervale od nekoliko stotina milisekundi do nekoliko desetina minuta. Empirijski podaci pokazuju da takve korelacije nisu zanemarljive, posebno za Web saobraćaj [2] i Ethernet [3]. One mogu prouzrokovati neefikasnost mehanizama za upravljanje redovima u ruterima, usled pokušaja da se apsorbuju povećana saobraćajna opterećenja. U dužim intervalima postaju značajni nestacionarni efekti kao što su dnevni uzorci saobraćajnog opterećenja.

Najpoznatiji modeli sa dugoročnim korelacijama su: ekstenzije ARIMA kao što je F-ARIMA (*Fractional ARIMA*), ekstenzije ARMA kao što je GARMA (*Gegenbauer AutoRegressive Moving Average*), zatim frakcionalni Gausov šum, frakcionalno Braunovo kretanje, diskretno Braunovo kretanje, agregacija On/Off izvora saobraćaja visoke varijabilnosti. F-ARIMA se koristi za modeliranje VBR video saobraćaja, generisanje dolaznih tokova, simulacionu analizu modela čekanja, kao i predikciju multimedijalnog saobraćaja [4]. GARMA omogućava modeliranje, predikciju kao i testiranje Ethernet i Internet saobraćaja, MPEG i JPEG video saobraćaja [4].

Verifikacija matematičkih modela saobraćaja obavlja se na osnovu stepena pogodnosti za opis realnog tipa saobraćaja, broja parametara potrebnih za opis modela, estimacije parametara i analitičke traktabilnosti. Iscrpan uporedni pregled navedenih klasa modela može se pronaći npr. u [4], [5] i [6].

Pored matematičkog modelovanja saobraćaja, većina alata za simulaciju pruža mogućnost rada sa zapisima realnog saobraćaja (*trace*), što se često koristi u simulaciji multimedijalnih izvora saobraćaja, izvora video signala i Web saobraćaja. U ovom slučaju se treba usredsrediti na zapise realnih izvora, a ne paketizovanog saobraćaja. Naime, u uslovima adaptivnog upravljanja zagušenjem, izvor saobraćaja menja brzinu emitovanja u zavisnosti od stanja mrežnih linkova. Posledica je da vremenski zapis emitovanja paketa u *trace* fajlu reflektuje i uslove u konkretnoj mreži u trenutku kada je veza ostvarena (fenomen oblikovanih *trace* fajlova [1]).

2.3 Raspodela saobraćaja

Raspodela saobraćaja izražava se matricom saobraćaja koja definiše izvor i odredište svakog toka saobraćaja koji se prenosi kroz mrežu, pri čemu matrica saobraćaja ne definiše putanje tokova od izvora do odredišta, već je to zadatak protokola i algoritama rutiranja implementiranih u čvorovima mreže.

2.4 Opsluživanje paketa u čvorovima mreže

Simulacionim modelom svakog čvora mreže treba da budu obuhvaćene relevantne karakteristike mehanizama za opsluživanje dolaznog i odlaznog saobraćaja. U uslovima podrške više nivoa kvaliteta servisa (*Quality of Service*, QoS) definišu se principi klasifikacije IP paketa i kontrole ulaznog saobraćaja u svakom ulaznom čvoru, kao i principi obrade različitih klasa dolaznog saobraćaja u svakom čvoru jezgra mreže.

Za odlazni saobraćaj definišu se mehanizmi opsluživanja paketa iz različitih klasa koji se multipleksiraju po zajedničkom izlaznom linku, kao i mehanizmi za upravljanje redovima. Poseban problem predstavlja pravilno konfigurisanje ulaznih parametara pojedinih mehanizama, u zavisnosti od konkretnih zahteva, primenjenih tehničkih rešenja i saobraćajnog opterećenja operativne mreže.

2.5 Rutiranje saobraćaja

Tradicionalni protokoli rutiranja u Internetu zasnovani su na paradigmi prosleđivanja IP paketa na osnovu specificirane adrese odredišta i pridruženog prefiksa. Paketi koji imaju isti prefiks usmeravaju se ka istom elementu mreže, što uslovljava da se najčešće koristi samo jedna putanja do zadatog odredišta, osim kada postoje višestruke putanje sa istom cenom. Ta pojava prouzrokuje neravnomernu raspodelu saobraćajnog opterećenja koja potencijalno utiče na pojavu zagušenja i stvaranje uskih grla mreže.

Algoritmi rutiranja u multiservisnoj mreži treba da uzmu u obzir zahteve za QoS i eventualno druge zahteve i/ili ograničenja. Različite vrste saobraćaja zahtevaju i različite komunikacione performanse. Tako su za prenos govora kritični kašnjenje i džiter. Za transakciono orijentisane aplikacije potrebno je da se gubitak paketa svede na zanemarljivu meru. Multimedijalni servisi u realnom vremenu, pored malog kašnjenja i džitera, zahtevaju velike propusne opsege. Definisane mere performansi i principa njihovog kombinovanja tako da se zadovolje zahtevi za QoS za pojedine klase saobraćaja, a da se pri tome omogući skalabilnost mreže, predstavlja ključni izazov u definisanju algoritama rutiranja u IP mrežama, a simulacije predstavljaju nezamenljiv alat za verifikaciju predloženih rešenja. Ovi problemi su podjednako relevantni za rutiranje u domenu i između domena. Dodatni zahtevi postavljaju se za *multicast* rutiranje u kontekstu kontrole grupne komunikacije, kao i *peer-to-peer* (P2P) komunikacije.

Scenarijem simulacije takođe se proverava dinamika mreže – predložena rešenja za preusmeravanje i restauraciju saobraćaja, npr. usled ispada jednog ili grupe linkova. Isto tako, scenarijem simulacije moguće je proveriti kako se rutiranje saobraćaja prilagođava uslovima u mreži, da bi se poboljšale ukupne performanse [7].

2.6 Protokol stek

Ukupne performanse od jednog do drugog kraja mreže značajno zavise od transportnih protokola koji se koriste u krajnjim sistemima, zbog čega simulacionim modelima izvora i odredišta saobraćaja treba pridružiti komponente koje modeliraju relevantne informacije o transportnim protokolima.

Najveći broj aplikacija za prenos podataka koristi TCP transportni protokol, koji sadrži mehanizme za oporavak od grešaka i adaptivno upravljanje protokom, tako da su pojedine performanse rezultat interakcije tih mehanizama sa protokolima rutiranja i mehanizmima kvaliteta servisa. U simulaciji treba uzeti u obzir i verziju TCP protokola koja je predviđena projektom mreže, jer danas postoji desetak različitih implementiranih verzija, koje se međusobno razlikuju upravo u mehanizmima kontrole protoka.

Sa druge strane, deo aplikacija u realnom vremenu (prenos govora – VoIP i multimedijalne aplikacije u realnom vremenu) koriste transportni protokol u realnom vremenu – RTP (*Real-time Transport Protocol*). Ovo svojstvo je bitno za ispitivanje relevantnih mera performansi za aplikacije u realnom vremenu (kašnjenje i džiter).

U ispitivanjima Web saobraćaja i u slučaju *multicast* komunikacije, u simulaciji treba uzeti u obzir i elemente protokola sesije – uspostavljanje, održavanje i raskidanje korisničkih sesija, jer oni direktno utiču na način rezervacije i korišćenja resursa mreže.

3. Pregled simulatora IP mreža

3.1 OPNET Modeler, SSFNet i J-Sim

OPNET Modeler [8] je komercijalni simulator koji podržava različite tehnologije LAN i WAN mreža (ATM, IP, mobilne mreže, bežični LAN i dr.) i implementira više od 400 funkcija za modelovanje protokola, elemenata mreže i dinamičkog ponašanja mreže. OPNET modeler pripada klasi simulatora vođenih događajima u diskretnom vremenu, a implementacija simulatora se zasniva na objektno-orijentisanom konačnom automatu kombinovanom sa analitičkim modelom. Raspoloživ je za *Windows* i *Unix* platforme. Kvalitetan grafički korisnički interfejs i iscrpna dokumentacija sa primerima simulacionih studija predstavljaju glavne prednosti ovog simulatora. Izvorni programi nisu slobodno dostupni – na raspolaganju je samo mogućnost generisanja scenarija simulacije sa promenljivim skupom ulaznih parametara.

SSFNet [9] je simulator sa slobodnom distribucijom i slobodno dostupnim izvornim programima. Namenjen je za modelovanje skalabilnih IP mreža i globalnog Interneta. SSFNet je simulator vođen događajima u diskretnom vremenu koji se implementira pomoću Java SSF (*Scalable Simulation Framework*) modula. Raspoloživ je za *Unix* i *Windows* platforme. Za opis apstraktnih simulacionih modela koristi se standardizovana sintaksa jezika DML (*Domain Modeling Language*), pomoću koje se mogu kreirati simulacioni modeli sa više desetina hiljada hostova i IP rutera.

J-Sim [10] implementira autonomnu arhitekturu zasnovanu na komponentama (*Autonomous Component Architecture, ACA*) na programskom jeziku Java. Telekomunikaciona mreža se modeluje hijerarhijski organizovanim komponentama, koje poseduju jednu ili više krajnjih tačaka – portova. Razmena informacija o tekućem vremenu simulacije obavlja se preko skupa unapred definisanih portova. J-Sim uvodi koncept centralizovanog upravljanja nezavisnim instancama izvršavanja simulacije (*background thread manager*), koji omogućava svim aktivnim instancama globalno praćenje simulacionog vremena. Programski jezik Java je pogodan za implementaciju ACA koncepta zbog objektno orijentacije, nezavisnosti od platforme, izvršavanja višestrukih instanci i dr. Distribucija i izvorni programi J-Sim su slobodni.

3.2 NS2 i pridruženi alati

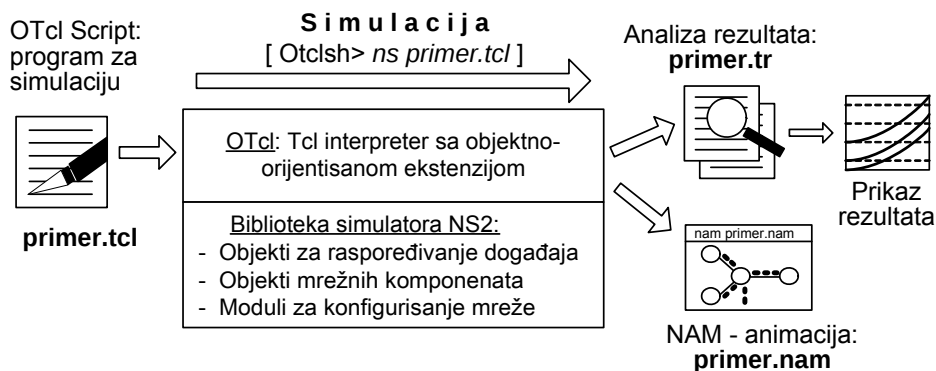
Simulator NS2 [11] je druga generacija mrežnog simulatora NS (*Network Simulator*), razvijenog polovinom devedesetih godina u okviru DARPA VINT (*Virtual Inter-Network Testbed*) projekta, u saradnji nekoliko vodećih američkih univerziteta. Veoma rasprostranjena upotreba u svetskim naučno-istraživačkim institucijama, intenzivan razvoj, kao i slobodna distribucija i slobodno raspoloživi izvorni programi predstavljaju glavne razloge opredeljenja autora ovog rada za korišćenje NS2 za potrebe istraživanja i edukacije.

NS2 implementira različite aplikacione i transportne protokole, *unicast* i *multicast* protokole rutiranja, protokole pristupa medijumu u lokalnim računarskim mrežama, protokole za mobilne ad hoc mreže, protokole za satelitsku komunikaciju. NS2

sadrži bogat skup generatora saobraćaja i ima mogućnost rada sa uzorcima realnog saobraćaja. Simulator obuhvata biblioteke za kreiranje topologije mreže i pruža mogućnosti za generisanje složenih scenarija simulacije, u pogledu skalabilnih mreža, višeslojnih modela i heterogenih izvora saobraćaja. U simulatoru su implementirani mehanizmi kvaliteta servisa, kao što su algoritmi za opsluživanje paketa, diferencirani servisi, multiprotokolska komutacija labela (MPLS) i dr.

NS2 pripada klasi simulatora vođenih događajima u diskretnom vremenu. Razvijen je metodama objektno orijentisanog projektovanja, na programskom jeziku C++, sa korisničkim interpreterom objektno orijentisanih Tcl (*Object-oriented Tool Command Language*, OTcl) skriptova. Raspoloživ je za nekoliko verzija operativnih sistema *Unix* (*Sun OS*, *Free BSD*, *Linux*) i *Windows* (98/2000/NT/XP). Dvojstvo programskih jezika je princip koji koriste i drugi simulatori, a potiče od potrebe da se poveća efikasnost procesa simulacije. U simulatoru NS2 se programiranje scenarija simulacije obavlja pomoću OTcl, koji je jednostavan za razumevanje, učenje i primenu. Efikasna obrada generisanih događaja omogućena je zahvaljujući C++ jezgru simulatora.

Na slici 1 je prikazan korisnički aspekt procesa simulacije pomoću NS2. Prvo se programira OTcl skript, u kome se kreira objekat simulatora, otvaraju pomoćni fajlovi za čuvanje rezultata i podataka za animaciju simulacije, definiše topologija mreže, izvori/odredišta saobraćaja, protokoli i scenario simulacije (raspored događaja u diskretnom vremenu). Moduli za raspoređivanje događaja i objekti mrežnih komponentata razvijeni su na programskom jeziku C++. Dodavanje novih komponentata simulatoru (npr. nova ili modifikovana verzija nekog protokola, novi algoritam za upravljanje redovima i dr.) vrši se dopunom izvornog C++ koda, a zatim kompilacijom i linkovanjem sa postojećim bibliotekama. OTcl moduli za konfigurisanje mreže omogućavaju efikasno uspostavljanje relacija između kreiranih mrežnih objekata. Sprega OTcl i C++ objekata ostvaruje se pomoću OTcl interfejsa koji za svaki C++ objekat kreira analogni OTcl objekat i uspostavlja potrebnu kontrolu.



Slika 1. *Korisnički aspekt procesa simulacije pomoću NS2*

Simulator je spregnut sa alatom za animaciju – NAM (*Network Animator*), koji omogućava vizuelno praćenje procesa simulacije (tokova saobraćaja, stanja linkova, stanja mrežnih čvorova, stanja redova i dr) posredstvom pogodnog grafičkog interfejsa.

Funkcija filtriranja omogućava analizu određenog tipa paketa, čvora ili toka saobraćaja. Funkcija monitora obezbeđuje kontinuiran nadzor vrednosti zadatih promenljivih.

Analiza rezultata simulacije obavlja se na osnovu zapisa – *trace* fajla koji generiše simulator. U *trace* fajl se upisuje unapred definisani podskup ili celokupan skup događaja (generisanje paketa, pridruživanje redu, prosleđivanje, odbacivanje i dr.) uređen po diskretnom vremenu simulacije. Generisanje željenih grafičkih prikaza na bazi *trace* fajla može se obavljati pomoću nekoliko slobodno dostupnih alata opšte namene, među kojima su poznati Xgraph (raspoloživ za *Unix* platforme) i Gnuplot (raspoloživ za *Unix* i *Windows*). Trace Graph [12] je alat raspoloživ za *Unix* i *Windows* platforme, koji je namenski razvijen za analizu NS2 *trace* fajlova, a poseduje mogućnost generisanja bogatog skupa dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih grafičkih prikaza.

3.3 Poređenje karakteristika simulatora

Komparativne analize performansi navedenih simulatora nisu objavljene u velikom broju, a postojeće publikacije uglavnom obuhvataju ograničen skup eksperimenata sa jednostavnim scenarijima simulacije.

U [13] su prikazani rezultati uporedne analize NS2 i OPNET Modeler-a u simulacionom i eksperimentalnom LAN okruženju, sa pet rutera i linkovima kapaciteta 10Mb/s i 100Mb/s. Korišćeni su deterministički i FTP izvori saobraćaja, sa UDP i TCP transportnim protokolima, respektivno. Da bi se procenila tačnost simulatora, izvršena su odgovarajuća merenja u realnoj LAN mreži. Rezultati analize pokazuju da su sa oba simulatora dobijeni slični rezultati simulacije u nekoliko različitih scenarija, sa približno istom brzinom izvršavanja simulacije. OPNET pruža više mogućnosti od NS2 u eksperimentalnom okruženju, što ga čini atraktivnijim alatom za mrežne operatore.

U [14] je upoređena skalabilnost simulatora NS2, JavaSim i SSFNet, u smislu brzine izvršavanja simulacije i zahteva za memorijskim resursima računara. Simulacioni model je podrazumevao multipliciranje nekoliko TCP veza po linku koji predstavlja usko grlo mreže. Rezultati analize su pokazali da je NS2 najbrži, ali i najzahtevniji u pogledu memorijskih resursa. J-Sim je znatno sporiji od ostala dva simulatora, ali zahteva znatno manje memorijskih resursa nego Java implementacija simulatora SSFNet.

Velika prednost slobodno dostupnih simulatora za potrebe istraživanja u oblasti IP mreža je u mogućnosti dodavanja novih ili izmeni postojećih karakteristika (predlog novih algoritama, modifikacija protokola i dr.). Nedostatak NS2 u odnosu na komercijalne simulatore, kao što je OPNET Modeler, je u lošijem korisničkom interfejsu i skromnijim mogućnostima za vizuelizaciju simulacije. Poseban problem je dokumentacija – u uslovima stalnog razvoja simulatora, ažurnost dokumentacije za NS2 ne prati u potpunosti stvarno stanje i mogućnosti simulatora.

4. Iskustva u istraživačkom radu korišćenjem simulatora NS2

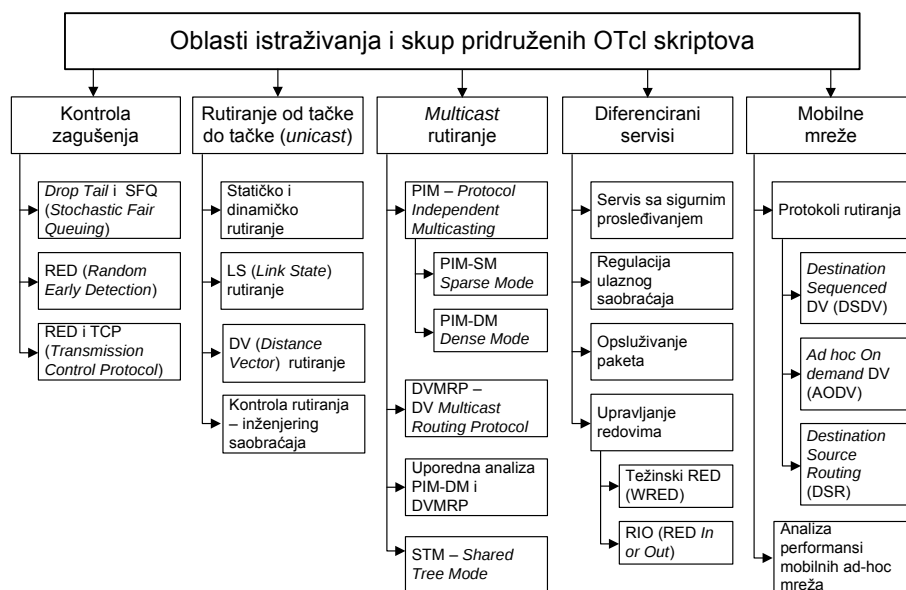
U Institutu "Mihajlo Pupin", simulator NS2 se primenjuje za potrebe istraživanja u oblasti IP mreža od 2003. godine. Istraživanja su od početka usmerena na arhitekture i mehanizme kvaliteta servisa, kao i optimizaciju performansi operativne mreže – inženjering telekomunikacionog saobraćaja [7], [15], [16].

Simulacija se primenjuje, samostalno i u kombinaciji sa analitičkim metodima, u svim elementima izbora rešenja za implementaciju QoS, što obuhvata modelovanje arhitekture QoS, varijante klasifikacije saobraćaja, izbor i konfigurisanje mehanizama

opsluživanja paketa, upravljanje kvalitetom servisa, rutiranje QoS. Pri simulaciji rešenja za implementaciju QoS ispituju se i promene opsega parametara, s obzirom na postojanje nelinearne povratne sprege u IP mrežama, kada ponekad i veoma mala promena vrednosti parametra može potpuno da promeni numeričke rezultate (tipičan primer su RED algoritmi za upravljanje redovima).

Pregled oblasti istraživanja i pridruženih scenarija simulacije prikazan je na slici 2. Formirana je bogata baza podataka sa više od 400 OTcl skriptova.

Verifikacija scenarija simulacije obuhvata proveru topologije, primenjenog protokol steka, algoritma rutiranja, principa adresiranja i izabranih rešenja za QoS. Potrebno je da se ispita ponašanje mreže u različitim uslovima rada, a posebno u najgorim uslovima (*worst case*) kao što su nagle promene saobraćajnog opterećenja, ispad pojedinih delova mreže, čas najvećeg opterećenja, ponašanje u uslovima opasnosti od zagušenja, asimetrične putanje podataka između krajnjih tačaka u suprotnim smerovima (npr. za TCP i ACK pakete). Poželjno je da se analizira skalabilnost mreže, tako što će se povećavati broj korisnika i saobraćajno opterećenje za red veličine (i više) i pokušati da odrede granice za posmatranu mrežu. U ovom slučaju se suočavamo sa potrebom da se definišu kompleksni scenariji simulacije i sa pitanjem koje su dozvoljene aproksimacije sa ciljem da se pojednostavi scenario, a pri tome sačuvaju bitne karakteristike dinamičkog ponašanja mreže.



Slika 2. Skup scenarija simulacije i pridružena baza OTcl skriptova

U toku je istraživanje koje ima za cilj sveobuhvatnu komparativnu analizu performansi simulatora NS2 u okruženjima operativnih sistema *Windows* i *Linux*. Neposredna motivacija za ovo istraživanje su problemi sa kojima smo se suočili u simulaciji mobilnih ad hoc mreža (MANET) tokom rada sa instalacijom NS2 na *Windows* platformi. Problemi se odnose kako na skalabilnost, tako i na mogućnosti analize

rezultata simulacije korišćenjem namenskog programa Trace Graph. Dodatnu motivaciju predstavlja činjenica da autorima ovog rada nisu poznate publikacije koje se bave analizom performansi pojedinih simulatora na različitim softverskim platformama.

U [17] su predstavljeni početni rezultati analize, kojom su obuhvaćeni sledeći aspekti: instalacija, korisnički aspekt, animacija, alati za analizu rezultata, izvršavanje različitih scenarija simulacije i skalabilnost. Radno okruženje predstavljaju: (1) *Windows XP Professional*, verzija 2002, SP2 i (2) *Linux*, koji je specificiran kernelom 2.6 na *Red Hat* distribuciji i *Fedora Linux* verzijom 6. Svi testovi izvršeni su na Pentium 4 CPU, 1.8GHz i 480MB RAM. Ispitivanje karakteristika rada NS2 u ova dva okruženja izvedeno je na osnovu izvršavanja niza simulacija istih skriptova na jednom, a zatim i na drugom operativnom sistemu. Posebna pažnja je poklonjena fiksnim mrežama, DiffServ simulacijama i MANET simulacionim modelima. Rezime analize prikazan je u tabeli 1

Tabela 1. Rezime analize [17]

Karakteristika	Windows	Linux
Instalacija	Iz delova	"All-in-one" ili iz delova
Animacija	NAM	NAM
Analiza rezultata	Trace Graph	Xgraph, Trace Graph
Izvršavanje simulacije	Sporiji; problem u simulaciji ad hoc mreža, zauzima više računarskih resursa	Brže simulacije; bez problema u simulaciji ad hoc mreža, zauzima manje računarskih resursa
Skalabilnost	Do 30 čvorova (MANET)	Preko 100 čvorova

Skriptovi za fiksne mreže su bez većih problema simulirani na obe platforme i dobijeni su ekvivalentni rezultati. Za simulaciju većih mreža, pri radu u *Linux* okruženju zauzima se manje slobodne memorije i simulacije traju kraće. U slučaju scenarija sa MANET i, posebno, integracije MANET sa fiksnom telekomunikacionom infrastrukturom u *Windows* okruženju se pojavljuje problem loše skalabilnosti.

5. Iskustva u edukaciji pomoću simulatora NS2

Prva iskustva u edukaciji studenata o simulaciji IP mreža pomoću simulatora NS2 ostvarena su u periodu od 2004. do 2006. godine, sa ukupno pet studenata Saobraćajnog fakulteta u Beogradu, koji su završavali svoju stručnu praksu, a zatim radili diplomske radove u Institutu "Mihajlo Pupin". Rad sa studentima je bio organizovan na konsultativnom nivou. Studenti su prvo morali da ovladaju osnovnim principima jezika Tcl i programiranjem simulatora NS2, a da se zatim posvete proučavanju literature o problematici diplomskog rada (rutiranje, kvalitet servisa, kontrola zagušenja i dr.). Sledile su simulacione analize povezane sa konkretnom problematikom rada. Ovakav rad imao je za posledicu vrlo kvalitetne diplomske radove. Rad je nastavljen i proširen na magistarske i master radove na Saobraćajnom i Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.

5.1 Predmet "Aplikativni softver"

Paralelno sa konsultativnim radom, pojavila se ideja da se simulacija IP mreža

korišćenjem slobodno dostupnog simulatora, uvede na osnovnim i diplomskim studijama, prvenstveno kao deo vežbi na odgovarajućim predmetima [18]. Međutim, problem koji je tada uočen sa simulatorom NS2 (a odnosi se generalno i na druge simulatore) je da ovladavanje programiranjem simulatora zahteva značajno vreme i konsekventno umanjuje ciljni efekat boljeg razumevanja gradiva iz oblasti mreža.

Predmet "Aplikativni softver" uveden je 2006. godine u nastavu kao izborni, na osnovnim studijama (III semestar) na Saobraćajnom fakultetu u Beogradu, na Odseku za telekomunikacije, Katedra za telekomunikacioni saobraćaj i mreže. Cilj predmeta je sticanje osnovnih znanja o principima razvoja aplikativnog softvera kroz praktičan rad – programiranje pomoću Tcl/Tk interpretera. Važno je napomenuti da studenti nemaju predznanja o računarskim i telekomunikacionim mrežama. Predmet je usredsređen na ovladavanje programiranjem na jeziku Tcl, programiranje simulatora NS2 i vizuelno praćenje toka simulacije pomoću animatora NAM. Tokom nastave, studentima se objasne osnovni pojmovi: čvor, link, topologija, deterministički izvor saobraćaja, paket, rutiranje. Pregled programa predmeta prikazan je u tabeli 2.

Tabela 2. Program predmeta "Aplikativni softver"

Nedelja	Program predavanja i vežbi
1,2	Osnovi programiranja na jeziku Tcl: rad sa interpreterom; sintaksa Tcl komande; promenljive; zamena komandi i vrednosti promenljivih; aritmetičke operacije i matematičke funkcije; procedure; programske petlje for i while; konstrukcija if-else; rad sa fajlovima.
3,4,5	Osnovi programiranja simulatora NS2: kreiranje "kostura" OTcl skripta; formiranje topologije mreže; kreiranje determinističkih izvora saobraćaja i pridruženih odredišta; definisanje scenarija simulacije; kontrola vizuelnog NAM prikaza (oblici, boje i nazivi čvorova; boje, nazivi i orijentacija linkova; boje tokova saobraćaja); poređenje tehnika DropTail i SFQ.
6, 7	Izrada I seminarskog rada i prezentacija rezultata
8, 9, 10	Efikasno programiranje simulatora NS2: definisanje elemenata mreže metodom simulacije; definisanje determinističkih izvora saobraćaja pomoću OTcl programskih struktura; kreiranje i korišćenje pomoćnih fajlova (komanda source); kreiranje kompleksnih topologija mreže.
11,12	Simulacija dinamike mreže pomoću NS2: osnovni pojmovi o rutiranju saobraćaja u mreži, simulacija otkaza mrežnog linka, podešavanje cena linkova, promena cena linkova tokom simulacije; dinamika mreža sa kompleksnom topologijom.
13, 14	Izrada II seminarskog rada i prezentacija rezultata

Kompletna nastava se odvija u računarskoj učionici. Program vežbi obuhvata oko 40 Tcl/OTcl skriptova. Studenti rade ukupno dva seminarska rada (u grupama po dvoje) koja obuhvataju programiranje skripta prema zadatom scenariju, a zatim prezentaciju rada, korišćenjem programa *MS Power Point*.

Tokom tri školske godine, broj studenata bio je između 14 i 20. U cilju ocene kvaliteta nastave i dobijanja sugestija za dalje poboljšanje, sprovedeno je nekoliko anketa

i intervjuu. Najveće je interesovanje studenata za uvođenje još dva ili tri slična, praktično orijentisana predmeta iz oblasti mreža (55% anketiranih). U tom kontekstu, treba napomenuti da će počevši od letnjeg semestra školske 2008/2009. godine na osnovnim studijama (VIII semestar) biti uveden predmet "Računarske mreže", koji će u programu vežbi obuhvatati simulacione analize performansi mreža pomoću simulatora NS2.

5.2 Korišćenje animatora mreže NAM

Programiranjem odgovarajućih OTel skriptova i vizuelnim prikazom pomoću animatora NAM, moguće je tokom predavanja studentima dodatno razjasniti problematiku iz oblasti telekomunikacionih i računarskih mreža i sistema. Ovaj pristup je primenjen, počevši od 2008. godine, u nastavi iz ukupno 4 predmeta na Elektrotehničkom i Saobraćajnom fakultetu u Beogradu (osnovne i master studije). Oblasti u kojima je NAM efikasno primenjivan kao dopuna slajdovima/predavanjima na tabli su: ilustracija funkcija pojedinih slojeva OSI modela, *unicast* rutiranje (algoritmi Dijkstra i Bellman-Ford), *multicast* rutiranje, mehanizmi i verzije TCP protokola, arhitektura diferenciranih servisa, brza restauracija saobraćaja u MPLS mreži i dr.

6. Zaključak

Kompleksnost IP arhitektura, topologija i saobraćaja čine simulacije perspektivnim alatom za istraživanje novih rešenja (algoritama i protokola), analizu performansi i ocenu dinamičkog ponašanja mreže. S obzirom na skalabilnost i heterogenost potrebno je koristiti proverene alate, definisati sveobuhvatne scenarije simulacije i pažljivo interpretirati rezultate. Poželjna je kombinacija simulacije sa drugim metodima – analitičkim, eksperimentalnim i mernim.

Iskustva u primeni simulacije u edukaciji iz oblasti IP mreža zasnovana su na simulatoru NS2 i obuhvataju konsultativni rad sa studentima, kao i primenu NS2/NAM u nastavi na Saobraćajnom i Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Literatura

- [1] S. Floyd, V. Paxson, "Difficulties in Simulating the Internet", *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 9, no. 4, August 2001, pp. 392-403.
- [2] M. Crovella, A. Bestavros, "Self-similarity in World Wide Web traffic: Evidence and Possible Causes", *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 5, no. 6, December 1997, pp. 835-846.
- [3] W. E. Leland et al., "On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (extended version)", *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 2, no. 1, February 1994, pp. 1-15.
- [4] M. Bakmaz, B. Bakmaz, "Mogućnosti autoregresionih modela telekomunikacionog saobraćaja", *Zbornik radova XXIV Simpozijuma o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – PosTel*, decembar 2006, Beograd, pp. 255-262.
- [5] *Teletraffic Engineering*, handbook, ITU-D SG2, Question 16/2, Geneva, 2005.
- [6] A. Adas, "Traffic Models in Broadband Networks", *IEEE Communications Magazine*, July 1997, pp. 82-89.

- [7] M. Stojanović, V. Aćimović-Raspopović, *Inženjering telekomunikacionog saobraćaja u multiservisnim IP mrežama*, naučna monografija, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, oktobar 2006.
- [8] "Introduction to Using OPNET Modeler", OPNETWORK 2002, Simulation and Modeling, SYSC 4005/5001.
- [9] Scalable Simulation Framework and SSFNet [Online]. Available: <http://www.ssfnet.org>
- [10] DRCL J-Sim. [Online]. Available: <http://www.j-sim.org>
- [11] "Network Simulator NS2 and Network Animator NAM". [Online]. Available: <http://www.isi.edu/nsnam>.
- [12] J. Malek, "Trace Graph – Network Simulator NS Trace Files Analyzer", 2003 – 2005. [Online]. Available: <http://www.tracegraph.com/>.
- [13] G. F. Lucio et al., "OPNET Modeler and NS-2: Comparing the Accuracy of Network Simulators for Packet-Level Analysis using a Network Testbed", *Proceedings of the International Conference WSEAS 2003 (CD)*, Greece, October 2003.
- [14] D. M. Nicol, "Comparison of Network Simulators", research results on simulation performance analysis, 2002. [Online]. Available: <http://www.ssfnet.org>.
- [15] S. Boštjančič, "Ugovaranje kvaliteta servisa u IP mrežama sa diferenciranim servisima", magistarska teza, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, 2007.
- [16] M. Stojanović, D. Popović, V. Aćimović-Raspopović, J. Gajica, "Primena simulacije u projektovanju elektroprivrednih telekomunikacionih mreža sa tehnologijom Internet protokola", *Elektroprivreda*, broj 3, jul-oktobar 2004, str. 65-77.
- [17] V. Timčenko, S. Boštjančič Rakas, M. Stojanović, "Analiza karakteristika simulatora IP mreža NS2 u Linux i Windows okruženju", *Zbornik radova TELFOR 2008 (CD)*, Beograd 2008.
- [18] N. I. Sarkar, "Teaching Computer Networking Fundamentals Using Practical Laboratory Exercises", *IEEE Trans. on Education*, vol. 49, no. 2, May 2006, pp. 285-291.

Abstract: *In this paper, we first explain principles of building models and scenarios for simulating Internet Protocol (IP) based networks. Further, an overview of four well-known network simulators is presented, including OPNET Modeler, SSFNet, J-Sim and Network Simulator version 2 (NS2). Research work relies on NS2 simulator and is focused to quality of service and traffic engineering solutions in operational networks. An important part of our current research work is focused towards a comprehensive comparison of NS2 performance in Windows and Linux operating systems environment. Experiences in education encompass applying simulation, based on simulator NS2, in teaching IP networking at the University of Belgrade.*

Keywords: *Internet Protocol, Network Simulator, Simulation script, Trace analysis.*

EXPERIENCES IN TEACHING AND RESEARCHING COMPUTER NETWORKING USING SIMULATION

Mirjana Stojanović, Slavica Boštjančič Rakas, Valentina Timčenko