

**dr. sc. Vlatko Lipovac, redovni profesor**

## **FUNKCIONALNE MREŽE**

**Tematika:** Analiza, mjerenja i testiranja performansi i kvalitete usluge multitehnoloških i multiservisnih mreža; što kažu signali, biti, okviri/čelije, paketi i protokoli ... ?

### **Sadržaj:**

#### **I. Arhitektura multiservisne multitehnološke komunikacijske mreže**

Opći model i fundamentalni parametri komunikacijskog sistema. Praktična hijerarhija suvremene javne telekomunikacijske mreže. Trendovi digitalizacije, sinkronizacije, integracije servisa i uvođenja paketske komunikacije. Javna telekomunikacijska mreža. Mrežna arhitektura mobilnih radiokomunikacijskih sistema. Arhitektura Interneta. OSI-ISO model komunikacija i evolucija prijenosnih komunikacijskih protokola. Konekcijske i nekonekcijske mrežne arhitekture. LAN i WAN mreže. Pregled LAN tehnologija i osnove TCP/IP. WAN transport za IP: Frame Relay i ATM. MPLS.

Multiservisne mreže. Internet i govor. Arhitektura VoIP sistema. VoIP i javna telekomunikacijska mreža. VoIP aplikacije i servisi. Komponente VoIP mreže. H.323 operativni model mreže. Usporedba H.323, SIP i MEGACO. Koegzistencija klasične i VoIP mreže. VoIP i inteligentna mreža (IN).

#### **II. Model kvalitete servisa i performansi**

QoS kao upravljanje dijeljenim resursima pod zagušenjem (od cestovnog prometa do ATM, FR, IP, MPLS...). Kvaliteta servisa na aplikacijskoj razini. Kvaliteta servisa i performanse nižih slojeva. QoS tehnike u LAN/WAN mreži. IP QoS arhitektura. Klasifikacija paketa; IP *Precedence*, *Differentiated Services* (DiffServ). Kontrola pristupa (IP/MPLS: RSVP, ATM: PNNI). Profiliranje i *policing* prometa (ATM *shaping*, Frame Relay *shaping*, IP: GTS, MPLS inženjering prometa).

Ovisnost kvalitete servisa viših od performansi i kvalitete servisa nižih slojeva. "Odozgo-nadolje" verifikacija kvalitete servisa. "Odozdo-nagore" princip instalacije i verifikacije performansi i kvalitete servisa po OSI-ISO slojevima. Hibridni metod verifikacije performansi.

Životni ciklus mreža. Održavanje QoS podatkovne mreže; izolacija i rješavanje problema. Proaktivni i reaktivni pristup. Strategijski i/ili taktički pristup; distribuirani sistemi i/ili analizatori protokola.

Sinergija analitičkog modela, rezultata programskih simulacija, te eksperimentalnih rezultata, kao metodički okvir znanstveno-istraživačke nadgradnje inženjerskog pristupa u oblasti analize performansi komunikacijskih mreža.

#### **III. Performanse digitalnog prijenosnog sistema**

Kodni i modulacijski kanal. Performansa prijenosa digitalnim sistemom. Performansa prijenosa diskretnim kanalom bez memorije, prema modelu Teorije informacija. Teorijska vjerojatnost bitske greške. Praktična performansa sistema i potreba za definiranjem dodatnih mjerila performanse (pored BER-a). Implementacijski margin i rezidualna vjerojatnost bitske greške. Primjer analitičkog modela za procjenu rezidualnog BER-a mobilnog radiofrekvencijskog kanala, male vremenske disperzije (*indoor* kanal). Poređenje rezultata proračuna rezidualnog BER-a po izvedenom izrazu i rezultata Monte-Carlo programske simulacije. Primjer procjene rezidualnog BER-a praktičnog mikrovalnog kanala sa ekstremno dugom dionicom. Detekcija i korekcija grešaka kao ultimativni način očuvanja performanse prijenosnog sistema.

*Out-of-service* i *in-service* metode testiranja performansi. Krajnja performansa regenerativnog prijenosnog sistema i performanse pojedinih dionica. Izolacija i lokalizacija dionica sa slabijom performansom. Blokofske greške i vremenska raspodjela bitskih grešaka unutar blokova. Evolucija standarda. prema

blokovski orijentiranim. Primjer izmjerene performanse procjene *in-service* metode testiranja kod plesiochronih (PDH) mreža; provjera pravila uokviravanja, kodiranja i CRC.

Sinkrone (SDH) digitalne prijenosne mreže. Povećanje upravljivosti inteligentnom prijenosnom mrežom i njenih potencijala za *in-service* testiranje. Primarni i sekundarni podaci o performansama prijenosne mreže. Tipične problemske situacije i mogućnosti detekcije, te lokalizacije problema na temelju primarnih i sekundarnih podataka za mrežne elemente. Potreba za mjerenjima i testiranjima na taktičkoj razini. Tipični testovi mrežnih operatora prilikom instalacije i održavanja. Verifikacija pravilnog rutiranja putanja tributarnih kanala. Verifikacija hijerarhije sinkronizacije i redosljeda komutiranja na nižu razinu. *Jitter* u prijenosnim mrežama. Sistematski *jitter* i njegova akumulacija. Definicije i testiranje *jitterskih* parametara PDH i SDH mrežnih elemenata. Standardne *jitter* testne sekvence. Povezivanje LAN mreža (GE i 10GE) i sinkronog transporta. Klasični (PoS) i novi standardi enkapsulacije.

#### **IV. Odabrana poglavlja iz analize i testiranja performansi fizičkog medija**

Testiranje performansi mikrovalnih radijskih prijenosnih sistema. Primjeri aktivnih testova na sistemskoj razini (simulacija *multipath fadinga*) i razini sklopova i komponenti (skalarna i vektorska analiza mikrovalne mreže). Primjeri pasivnih testova na sistemskoj razini. Analiza konstelacije. Analiza spektra. Kompromisi pri izboru parametara (za optimalnu analizu).

Odabrani primjeri iz analize i testiranja performansi optičkih prijenosnih sistema. Klasična mjerenja optičke snage i slabljenja, optička vremenska reflektometrija. Mjerenja kromatske disperzije (CD) i polarizacijske disperzije (PMD). Centralizirani nadzor optičkog transportnog sistema.

GSM standardi i mjerenja. Testiranja predajnika. Modeli mjerenja u vremenskom, frekvencijskom i modulacijskom domenu. CCDF krivulje. Mjerenje kvalitete modulacije određivanjem EVM vektora. Procedure za detekciju i izolaciju problema. Testiranja prilikom instalacije i održavanja baznih stanica. Rješavanje problema analizom spektra. Detekcija i identifikacija interferirajućih signala. GPRS model mjerenja. Performansa RF sloja. Mjerenja na bazi prijemnika i s gledišta krajnjeg korisnika. Izazovi testiranja 3G mreža UMTS operatora. CDMA problemi: pilotsko “zagađenje” i “nedostajući susjedi”. *Drive test* rješenja.

#### **V. Analiza i testiranje performansi i QoS podatkovnih mreža**

Klasična analiza protokola. Pasivni nadzor i simulacija. Dekodiranje i statistička analiza za detekciju novih protokola i mrežnih elemenata. Testiranje sukladnosti standardnim i privatnim protokolima. Koncept filtriranja u realnom vremenu ulaznih podataka.

Primjer testiranja WAN mreže: Frame Relay. Povezivanje na mrežu. Potrebne performanse akvizicije podataka. Vrijednosti parametara filtera ulaznih podataka. Znaci vitalnosti fizičkog sloja. Nadzor signalizacijskih sekvencija. Statistička analiza aktivnih virtualnih krugova. Identifikacija virtualnih krugova s neadekvatnom performansom (zagušenjem) i praćenje prioritetizacije okvira. Nadzor enkapsuliranih LAN protokola. Praćenje aktualnih i poređenje sa garantiranim vrijednostima parametara (CIR) iz servisnog ugovora.

Primjeri testiranja različitih mreža. Povezivanje na mrežu. *In-service* praćenje stanja i alarma fizičkog sloja. Testiranje po slojevima. *In-service* praćenje stanja slojeva. BER testiranje na razini okvira i/ili ćelije, odnosno reasembliranog okvira. Vrijednosti parametara filtera ulaznih podataka. Statistička analiza aktivnih virtualnih krugova. Identifikacija virtualnih krugova s neadekvatnom performansom (zagušenjem) i praćenje prioritetizacije okvira/ćelija. Testiranja QoS. Varijacije kašnjenja i gubici okvira/ćelija. *Leaky bucket* algoritam. Klasifikacija okvira/ćelija; GCRA algoritam. Praćenje funkcioniranja mrežnog *policing* postupka poređenja aktualnih i, servisnim ugovorom, garantiranih vrijednosti parametara prometa. Praćenje funkcija upravljanja mrežom. Nadzor enkapsuliranih LAN protokola. Testiranje komutiranih virtualnih krugova. Generiranje prometa i ostali aktivni testovi.

Podatkovne performanse mobilnih mreža (GSM, GPRS i UMTS). Optimizacija mobilnih mreža. *Drive test* rješenja. Analiza UMTS protokola; dekodiranje RAN i IIOP (CORBA). Opća arhitektura testnog hardwarea. Podatkovne performanse radijske mreže s gledišta krajnjeg korisnika. Mjerenje propusnosti, pouzdanosti, dostupnosti i kašnjenja.

Strategija proaktivnog upravljanja i testiranja kod LAN mreža. Klasična i ekspertna analiza protokola. Statistička analiza MAC sloja i viših protokola. Korelirana analiza mrežnih čvorova, njihovih konekcija i primijenjenih protokola. Identifikacija virtualnih LAN mreža. Prilagođavanje vrijednosti pragova

parametara komentatora ekspertnog sistema mreži koja se testira *baseline* postupcima. Tipični problemi TCP/IP mreža i postupci njihove identifikacije i izolacije. Generiranje prometa i drugi aktivni testovi.

Primjer ekspertne analize IP mreže sa vrlo dugim vremenom odziva. Verifikacija problema aktivnim testiranjem performanse.

Distribuirani sistemi praćenja performanse i QoS komunikacijskih mreža. Standardi. SNMP protokol. Ekstenzije proizvođača opreme. Identifikacija i rješavanje problema korištenjem MIBova ili namjenskih RMON agenata, i/ili analizatora protokola. Hibridni distribuirani sistemi za centraliziranu ekspertnu analizu problema u mreži. Primjeri distribuiranog nadzora podatkovnih mreža. Sinkronizacija mjernih agenata. Segmentacija mreže aktivnim i pasivnim testiranjem radi izolacije izobličenja i identifikacije problema.

*Out-of-service* testiranje mrežnih komponenta prilikom instalacije i tehničkog prijema. Tipični aktivni testovi vremena prolaza paketa kroz mrežni element, njegove propusnosti i prijenosnih karakteristika.

Primjer testiranja brzih usmjerivača (Gbit/s, Tbit/s, Pbit/s...) suvremenih integriranih IP optičkih mreža.

## VI. VoIP i QoS

QoS faktori u VoIP. Inherentna nepogodnost Interneta za prijenos telefonskog signala. Parametri performanse krajnjeg korisnika. Definicija kvaliteta signala govora; subjektivni (MOS) i objektivni kriteriji. Ključni faktori i pitanja isporuke govornih paketa u realnom vremenu. Kašnjenje. Varijacije kašnjenja i jitterska odvajajuća memorija. Odjek i poništavači odjeka. Izobličenja IP mreže i njihov utjecaj na performansu VoIP servisa kod krajnjeg korisnika. RTP i QoS. Jitter IP paketa i jitter RTP paketa. Utjecaj jitera na gubitak paketa. Gubitak paketa i njegov utjecaj na kvalitetu govora. Kašnjenje paketa i njegov utjecaj na gubitak paketa, kašnjenje govora i odjek.

Preliminarne metode procjene podobnosti mreže za VoIP i IP podatkovne servise. Postavljanje ciljne performanse za IP mrežu (gubitak paketa, jitter, kašnjenje) i kvalitet govora (jasnoća, MOS, ukupno kašnjenje govora, npr. prema ITU-T Rec. G.114, odjek, prema ITU-T Rec. G.131 prema nivou odjeka, kašnjenja i gubitka signala). Instalacija i utvrđivanje srednje performanse VoIP servisa i IP mreže. Usporedba kvaliteta govora VoIP i klasične mreže.

Testiranja prilikom uvođenja VoIP servisa. Ravnina signalizacije: interoperabilnost. Ravnina medija: QoS. Testiranje VoIP signalizacije i testiranje VoIP kvaliteta (VQT). Izazovi testiranja konektivnosti između klasične TDM mreže i mreže IP telefonije. Uspostava poziva, registracija/rezolucija i translacija adrese. Nedovoljni mrežni resursi. Ekspertna analiza signalizacijskih protokola H.323, SIP, MGCP i identifikacija problema interoperabilnosti. Mjerenje performanse krajnjeg korisnika i/ili performanse same IP mreže? Pasivna mjerenja; parametri performanse IP mreže. Nadzor RTP i RTCP protokola. Trendovi *jitera* i gubitka paketa i identifikacija njihovog uzroka putem korelacije s dekodiranim RTP paketima. Ekspertna RTP analiza. ITU-T E-model. Pasivna prediktivna mjerenja MOS kvaliteta. Aktivna mjerenja perceptualnog kvaliteta govora (VQT). MOS i emulacija VoIP paketa. Perceptualni i kognitivni model. PSQM, PSQM+, PESQ, PAMS; poređenje metrika vjernosti. Testiranje kašnjenja. Testiranja odjeka (PACE) te parametara poništavača odjeka. Testiranja generatora pozadinskog šuma i izobličenja DTMF tonova. Centralizirano i distribuirano VQT testiranje. Tipične konfiguracije (analogno - IP i obratno; IP - IP). Tipični scenariji kod distribuiranog VQT testiranja. Korelacija IP/RTP - QoS testiranja sa VQT mjerenjima kao integralni konačni metod procjene VoIP QoS.

Optimizacija/planiranje i upravljanje performansom za postizanje kvaliteta govora. Planiranje rasta mreže bez narušavanja VoIP QoS.

## Literatura

1. V. Lipovac, "Testing QoS of Multiservice Networks", *CRC Press New York* (u pripremi; izlazi iz štampe do proljeća 2007.)
2. V. Lipovac, "Rezidualna performansa MSK baziranih mobilnih sistema sa malom vremenskom disperzijom", ETF Sarajevo, 2005.
3. V. Lipovac, "Osnove mikrovalnih komunikacija; komponente i aplikacije", Sveučilište u Dubrovniku, 2005.
4. Materijali s predavanja (dijelom u elektroničkoj formi, a dijelom *hard copy*)
5. Odabrani dodatni materijali – tutorijali WAN i LAN tehnologija (FrameRelay, ATM, LAN, TCP/IP...), *snap-shotovi* mjerenja, aplikacijski izvještaji proizvođača...

## Dodatna literatura (u vezi s odabranim primjerima)

### Poglavlje III

6. V.Lipovac, "On the Error Floor of MSK Signal Transmission over a Multipath Channel with Small Time Dispersion", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.49, no.1, pp.117-129, January 2000
7. V. Lipovac, "Impact of Transmitter and Receiver Filtering on the Phase and Error Floor of MSK Signal Indoor Transmission", European Transactions on Telecommunications, vol. 15, no.1, pp. 49-54, January-February 2004
8. M. Hadžialić, V. Lipovac, "Consistence between the Block-Error and the Bit-Error Based Residual Performance of Practical SDH Microwave Links with Extremely Long Hops", Proc. 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference MELECON 2004, Dubrovnik, May 12-15, 2004
9. M. Hadžialić, V. Lipovac, "Estimation of Residual Bit-Error Rate from the Standard Block-Error Rate Data for Practical Extremely Long SDH Microwave Links, Proc. 1<sup>st</sup> International Conference on Information & Communication Technologies: from Theory to Applications, ICTTA'04, Damascus, April 19-23, 2004
10. M. Hadžialić, V. Lipovac, "Practical Performance of SDH Microwave Links with Extremely Long Hops", Proc. IEEE International Conference on Telecommunications ICT2003, vol. II, pp.1584-1589, Papeete, Tahiti, February 2003

### Poglavlje IV

11. V.Lipovac, C.Kunz, M.Milković, "Simulating Signal propagation Effects of the Mobile Radio", Proc. 6<sup>th</sup> International Symposium on DSP for Communication Systems DSPCS'02", pp.43-48, Sydney-Manly, January 2002
12. V.Lipovac, A.Sertić, "Developing Test Methods for Installation and Maintenance of GSM Base Stations", Proc. 11<sup>th</sup> Seminar and Exhibition on Telecommunication and Information Networks, pp.195-204, Keszthely, October 1998
13. V.Lipovac, "A Field Measurement Solution for Testing RF Communications Systems", Proc. IEEE Conference on Personal, Indoor and Mobile Communications, pp.109-110, Siofok, May 1992

### Poglavlje V

14. V.Lipovac, "Practical Analysis of the Stability of TCP", Proc. IEEE International Microwave and Optoelectronics Conference IMOC 2001, pp.277-280, Belem, Brazil, August 2001
15. V.Lipovac, V.Batoš, M.Milković, "Monitoring of Real Network Performance", Proc. 5<sup>th</sup> World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics SCI 2001, vol. II, pp. 379-382, Orlando, July 2001
16. V.Lipovac, B.Modlic, M.Milković, "Performance of TCP/IP Stacks", Proc. IEEE International Conference on Telecommunications ICT2001, vol. 2, pp.296-301, Bucharest, June 2001
17. V.Lipovac, V.Batoš, M.Milković, "Testing the Performance of Multiple TCP/IP Stacks", Proc.12<sup>th</sup> Conference on Telecommunication and Information Technology Networks", pp. 239-248, Sopron, October, 2000
18. V.Lipovac, "Testing for Installation and Maintenance of ATM Networks", Proc. SOFTCOM'97, pp.237-246, Split-Bari-Dubrovnik, October 1998
19. V.Lipovac, A.Sertić, "Test Requirements and Solutions for Broadband Networks", Proc. 11<sup>th</sup> Seminar and Exhibition on Telecommunication and Information Networks, pp.211-218, Keszthely, October 1998
20. V.Lipovac, "Testing of ATM Networks: Requirements and Solutions", Proc. International Symposium on ATM, Bratislava, September 1998
21. V.Lipovac, "Management and Troubleshooting Multi-Technology and Multi-Protocol Networks", 10th Seminar on Telecommunications Networks, Siofok, October 1996
22. V.Lipovac, "Troubleshooting Local Area Networks by Means of Expert Systems", Proc. IEEE Conference on Personal, Indoor and Mobile Communications, pp.241-246, Sopron, September 1994

### Poglavlje VI

23. V.Lipovac, "Testing Voice over IP Quality", 13<sup>th</sup> Conference on Telecommunication and Information Technology Networks, pp. 273-278, Siofok, September, 2002
24. V.Lipovac, B.Modlic, A.Sertic, "Practical Estimation of VoIP QoS Based on Correlated Analysis of Transport Protocol Impairments and Perceptual Speech Quality", Proc. IEEE International Conference on Telecommunications ICT2002, vol. 1, pp.1030-1034, Beijing, June 2002