



Fleksibilni Internet servisi na bazi kontrole kašnjenja i propusnosti

Vladimir V. Vukadinović

Elektrotehnički fakultet
Univerzitet u Beogradu





Sadržaj prezentacije

- Uvod i motivacija
- Kvalitet servisa (QoS) na Internetu
- Postojeći predlozi arhitektura za fleksibilne servise
- Predlog nove arhitekture za fleksibilne servise
- Packet Loss Controller (PLC)
- Rezultati simulacija
- Zaključak i otvoreni problemi



Uvod

- Internet aplikacije imaju različite zahteve u pogledu kvaliteta servisa.
- Real-time aplikacije:
 - zahtevaju malo kašnjenje i varijacije kašnjenja paketa
 - fleksibilne su u pogledu povremenih gubitaka paketa
- Aplikacije za transport podataka:
 - zahtevaju pouzdan transfer i dobru propusnost
 - tolerantne su u pogledu kašnjenja paketa
- Današnji Internet pruža samo **best-effort** servis.



Motivacija: kvalitet servisa

- Dva koncepta obezbeđivanja kvaliteta servisa:
 - Integrisani Servisi (IntServ)
 - Diferencirani Servisi (DiffServ)
- Njihova realizacija sputana je ozbiljnim preprekama.
- Fokus istraživanja je preusmeren ka jednostavnijim rešenjima kao što su **fleksibilni (non-elevated) servisi**.
- Brojne prednosti u poređenju sa IntServ i DiffServ:
 - skalabilnost
 - jednostavnost
 - postepena implementacija
 - sloboda odabira klase servisa



Motivacija: fleksibilni servisi

- Fleksibilnih servisa podrazumevaju kompromis u pogledu kvaliteta različitih QoS parametara.
- Moguće je, ponuditi dve klase servisa:
 - servis malog kašnjenja
 - servis pouzdanog transporta
- Postoji nekoliko predloga arhitekture za pružanje fleksibilnih servisa: ABE, BEDS i EDS.
- Predložene arhitekture nisu prilagođene transportnim protokolima čije performanse istovremeno zavise od:
 - kašnjenja
 - verovatnoće gubitaka



Ciljevi teze



- Definirati novu arhitekturu za pružanje fleksibilnih servisa:
 - malo kašnjenje za **real-time aplikacije (delay-sensitive)**: IP telefonija, Video on Demand, Video konferencija
 - barem istu propusnost kao u best-effort mreži za **aplikacije za prenos podataka (throughput-sensitive)**: FTP, HTTP, SMTP
- Definirati i testirati mehanizme za pružanje fleksibilnih servisa:
 - **raspoređivač** za proporcionalnu diferencijaciju kašnjenja
 - **kontroler** koji reguliše odbacivanje paketa u baferima



Sadržaj prezentacije

- Uvod i motivacija
- **Kvalitet servisa (QoS) na Internetu**
- Postojeći predlozi arhitektura za fleksibilne servise
- Predlog nove arhitekture za fleksibilne servise
- Packet Loss Controller (PLC)
- Rezultati simulacija
- Zaključak i otvoreni problemi



Kvalitet servisa (QoS)

- QoS podrazumeva mogućnost da aplikacija dobije mrežni servis koji joj je potreban za uspešno funkcionisanje.
- Mreža sa implementiranim **QoS mehanizmima** pruža garancije u pogledu **QoS parametara**:
 - propusnosti
 - verovatnoće gubitaka paketa
 - kašnjenja paketa
 - varijacije kašnjenja paketa
- **QoS mehanizmi** mogu biti implementirani:
 - na mrežnom nivou (u ruterima)
 - na aplikativnom nivou (u perifernim stanicama)

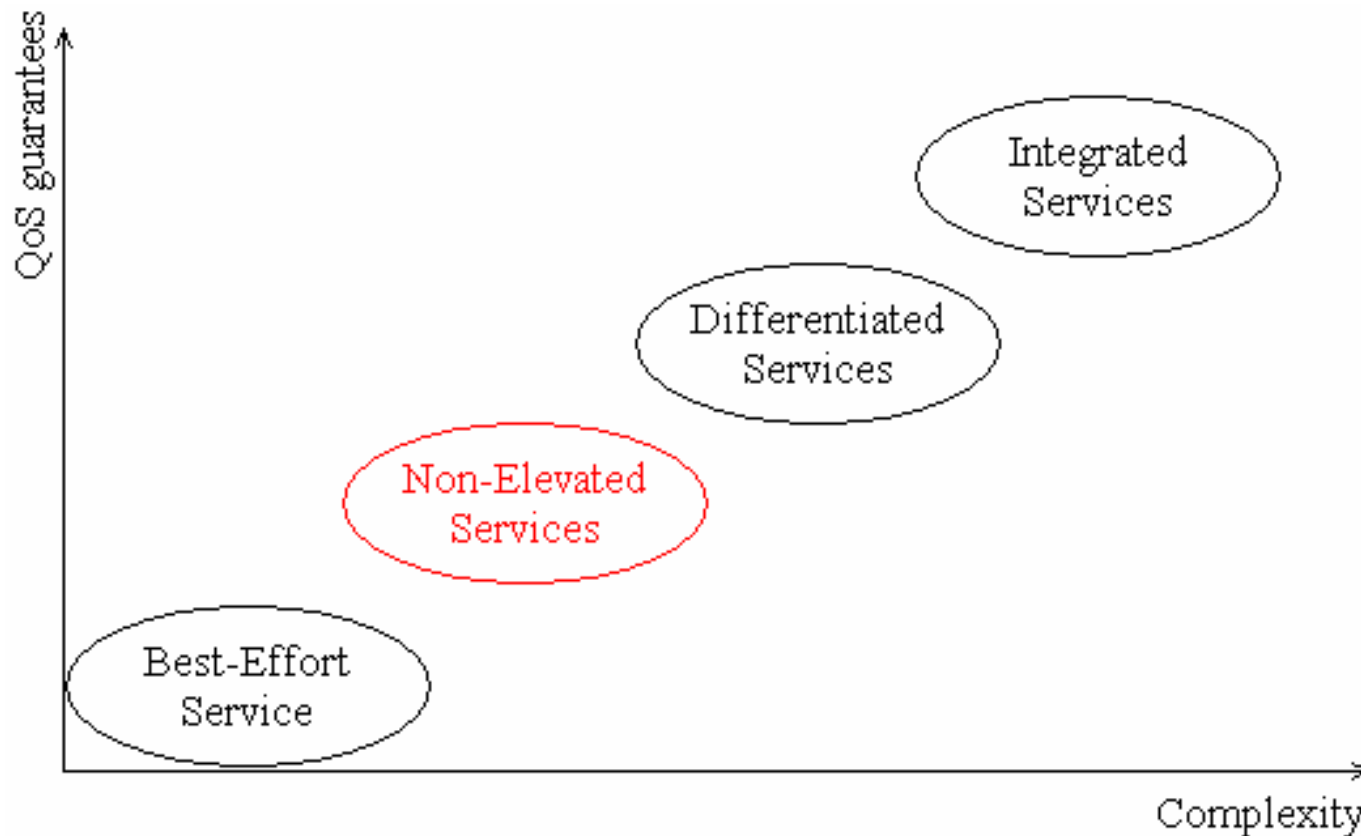


QoS arhitekture

- **QoS arhitektura** podrazumeva **skup mehanizama** koji zajedno obezbeđuju određeni nivo kvaliteta servisa.
- QoS arhitekture se mogu klasifikovati na osnovu:
 - granularnosti garancija: nivo **konekcije** ili **klase**
 - tipa garancija: **apsolutne** ili **relativne**
 - dometa garancija: “**end-to-end**” ili **lokalni segment**
- QoS arhitekture klasifikujemo u tri **servisna modela**:
 - Integrirani servisi (IntServ)
 - Diferencirani servisi (DiffServ)
 - Fleksibilni servisi



Poređenje QoS modela



QoS garancije vs. kompleksnost za postojeće servisne modele



Integrirani servisi (IntServ)

- Predloženi od strane IETF-a ranih 90-tih.
- Pruža **apsolutne "end-to-end"** QoS garancije na nivou **konekcije**.
- Ključne komponente:
 - admission control
 - traffic policing
 - Resource Reservation Protocol (RSVP)
- Glavni nedostatci:
 - implementaciona kompleksnost
 - problem skalabilnost (informacije o zahtevanim resursima)
 - velika inicijalna ulaganja (nadgradnja kompletne mreže)



Diferencirani servisi (DiffServ)

- Novijeg datuma u odnosu na IntServ. Predlog IETF-a.
- DiffServ pružaju **apsolutne** ili **relativne** QoS garancije na nivou **klase** i to na **lokalnom segmentu** linka.
- Agregacijom tokova podataka u klase eliminiše se problem skalabilnosti.
- Glavni nedostatci:
 - poteškoće da se osiguraju performanse iz SLA* ugovora
 - zahtevaju nadgradnju kompletne mreže
 - dramatične promene u načinu funkcionisanja mreže
 - nedostatak podrške ISP-ova i proizvođača opreme (QBone)

* Service Level Agreement



Fleksibilni (non-elevated) servisi



- Ni jedna klasa servisa nije **bolja**, već samo **drugačija** u poređenju sa ostalim klasama.
- Pružaju **relativne** QoS garancije na nivou **klase** i to na **lokalnom segmentu** linka.
- Bazirani su na kompromisu kvaliteta QoS parametara.
- Karakteristike fleksibilnih servisa:
 - ne pružaju čvrste garancije kvaliteta servisa
 - omogućavaju inkrementalnu nadogradnju mreže
 - jednostavnost i funkcionalnost današnjeg Interneta:
 - ne zahtevaju traffic policing i admission control
 - jednostavno tarifiranje servisa – ista cena za sve klase

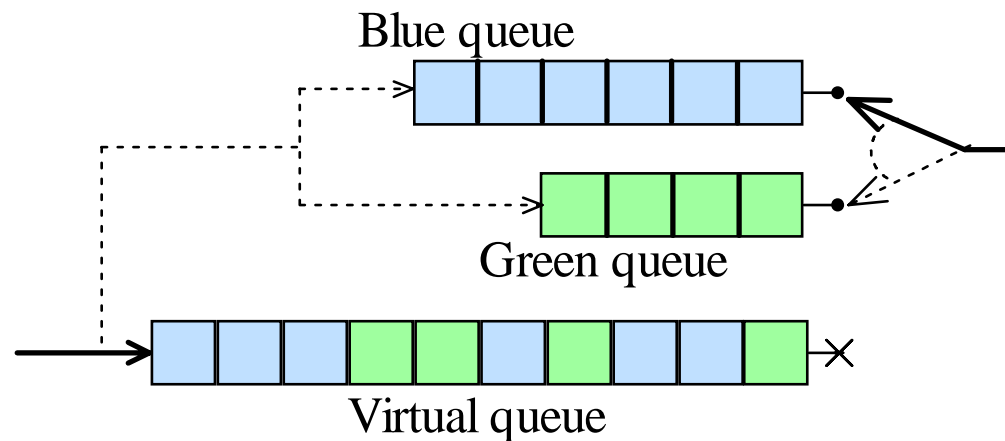


Sadržaj prezentacije

- Uvod i motivacija
- Kvalitet servisa (QoS) na Internetu
- **Postojeći predlozi arhitektura za fleksibilne servise**
- Predlog nove arhitekture za fleksibilne servise
- Packet Loss Controller (PLC)
- Rezultati simulacija
- Zaključak i otvoreni problemi



Alternative Best-Effort (ABE)



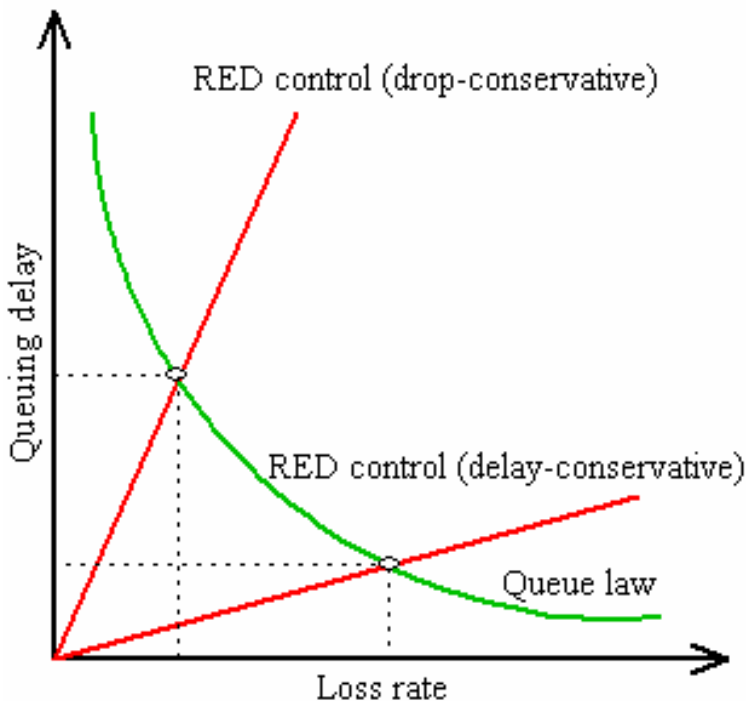
- ABE [Hurley et al., 2001] uvodi dve klase servisa:
 - "plavu": best-effort
 - "zelenu": real-time
- Zelenim paketima je garantovano ograničeno kašnjenje d .
- Aplikacije su slobodne da obeleže svoje pakete kao plave ili zelene.



Alternative Best-Effort (ABE)

- **Plavi** paket ne sme biti servisiran kasnije od njegove kopije u virtuelnom redu.
- **Plavi** paket ne sme biti odbačen ako njegova kopija u virtuelnom redu nije odbačena.
- **Zeleni** paket se servisira samo ako **plavi** paket može da čeka.
- **Zeleni** paket se odbacuje ako ne može da zadovolji ograničenje kašnjenja d .

Best-Effort Differentiated Services (BEDS)



- BEDS [Firoiu et al., 2001] definiše dve vrste servisa:
 - drop-conservative za TCP
 - delay-conservative za UDP
- Paketi se smeštaju u dva **RED*** reda sa različitim parametrima.
- Preseci **kontrolnih krivih** RED algoritma i "**queue zakona**"** definišu operative tačke za klase servisa.

* Random Early Detection

$$** \quad nT(p, R_0 + q/C) + m(1-p)U = C$$

Best-Effort Differentiated Services (BEDS)

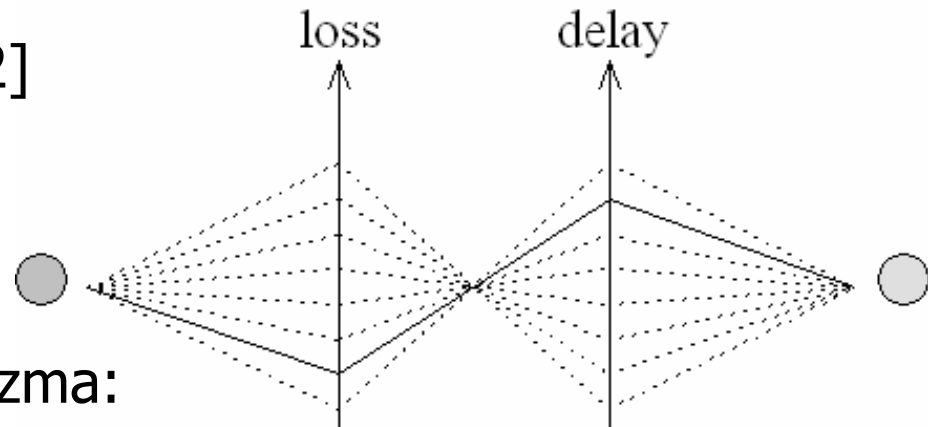


- Moguće su strategije za servisiranje paketa sa fiksnim odnosom:
 - kašnjenja
 - verovatnoće gubitaka
 - kašnjenja i verovatnoće gubitaka
- Glavni nedostatci:
 - diferencijacije kašnjenja i diferencija verovatnoće gubitaka se razmatraju nezavisno
 - šema nije primenljiva u slučaju protokola čije performanse zavise i od kašnjenja i od verovatnoće gubitaka paketa

Equivalent Differentiated Services (EDS)



- EDS [Gaidioz et al., 2002] uvodi asimetričnu diferencijaciju kašnjenja i verovatnoće gubitaka.



- Bazira se na dva mehanizma:
 - Waiting-Time Priority (WTP) raspoređivaču
 - Proportional Loss Rate Dropper (PLR) algoritmu
- Glavni nedostatci:
 - podešavanje parametara je ostavljeno kao otvoren problem
 - autori ne razmatraju uticaj predloženog mehanizma na TCP



Sadržaj prezentacije

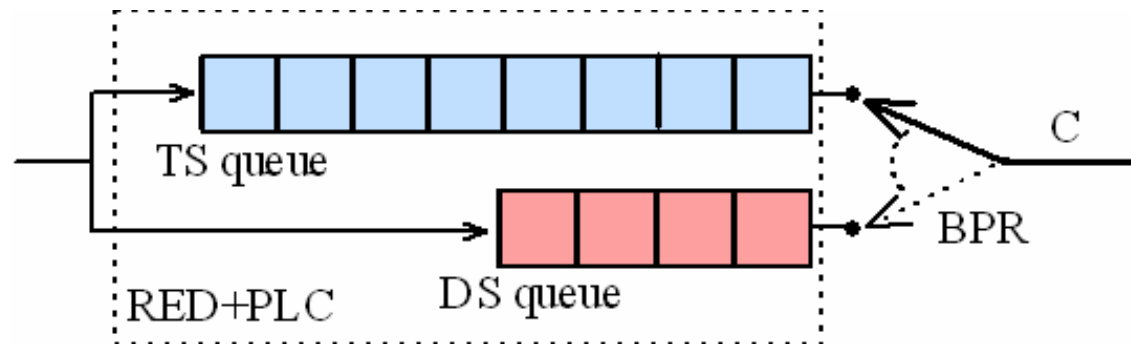
- Uvod i motivacija
- Kvalitet servisa (QoS) na Internetu
- Postojeći predlozi arhitektura za fleksibilne servise
- **Predlog nove arhitekture za fleksibilne servise**
- Packet Loss Controller (PLC)
- Rezultati simulacija
- Zaključak i otvoreni problemi

Predlog nove arhitekture za pružanje fleksibilnih servisa



- Definiše dve klase servisa:
 - **throughput-sensitive (TS)**: TCP protokol
 - **delay-sensitive (DS)**: UDP ili sličan protokol
- **TS** klasa servisa pruža barem istu propusnost kao best-effort servis.
- **DS** klasa pruža proporcionalno manje kašnjenje od **TS** klase.
- **TS** i **DS** klasa pružaju različite servise, ali se ni za jedan ne može reći da je bolji od drugoga.
- Aplikacija može da odabere servis **TS** ili **DS** klase koristeći ToS polje u IP zaglavlju.

Mehanizmi za realizaciju predložene arhitekture: BPR+PLC



- **Backlog Proportional Rate (BPR)** raspoređivač obezbeđuje proporcionalnu diferencijaciju kašnjenja.
- **Packet Loss Controller (PLC)** obezbeđuje barem istu propusnost za **TS** klasu servisa kao best-effort servis.



Backlog Proportional Rate (BPR)

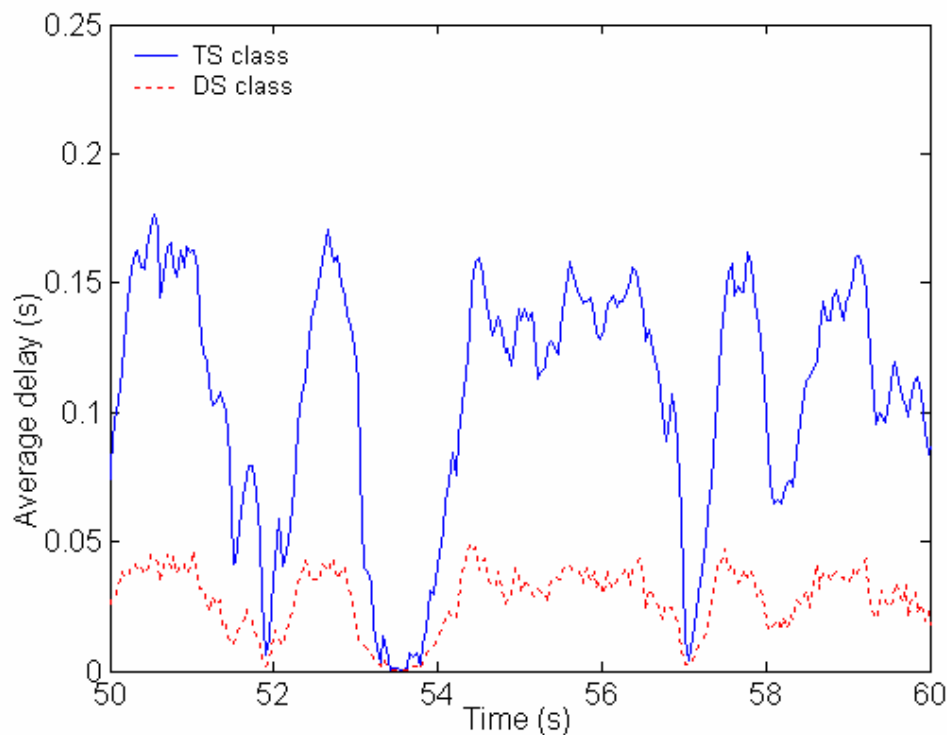
- BPR [Dovrolis et al., 2002] obezbeđuje konstantan odnos kašnjenja **TS** i **DS** paketa.
- BPR raspoređivač određuje brzine servisiranja **TS** i **DS** paketa (r_{TS} i r_{DS}) na osnovu dužina redova (q_{TS} i q_{DS}) i željenog odnosa kašnjenja δ :

$$\frac{r_{TS}(t)}{r_{DS}(t)} = \frac{1}{\delta} \frac{q_{TS}(t)}{q_{DS}(t)}$$

- Brzine servisiranja se dobijaju iz: $r_{TS}(t) + r_{DS}(t) = C$
- Empirijski se može se pokazati da u slučaju intenzivnog saobraćaja:

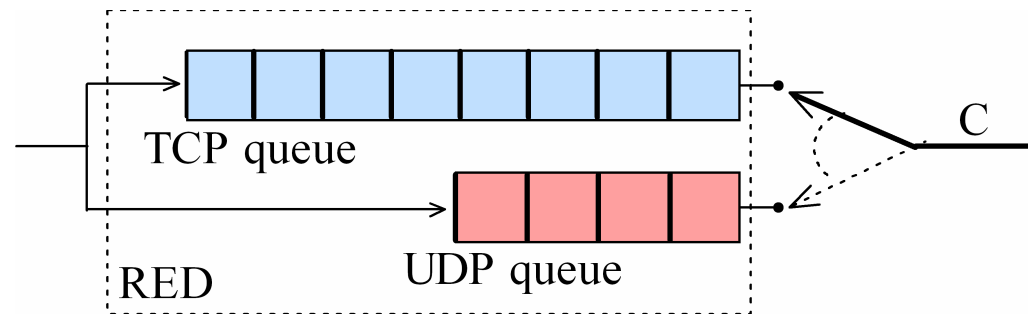
$$\frac{\bar{d}_{TS}}{\bar{d}_{DS}} \rightarrow \delta$$

Primer diferencijacije kašnjenja pomoću BPR raspoređivača



- ON-OFF Pareto izvori
- Veličina paketa: 500 bajta
- $N_{TS} = N_{DS} = 5$
- Intenzitet saobraćaja: 100%
- Odnos kašnjenja: $\delta=4$
- Kapacitet bafera: 250 paketa

Uticaj diferencijacije kašnjenja na TCP aplikacije

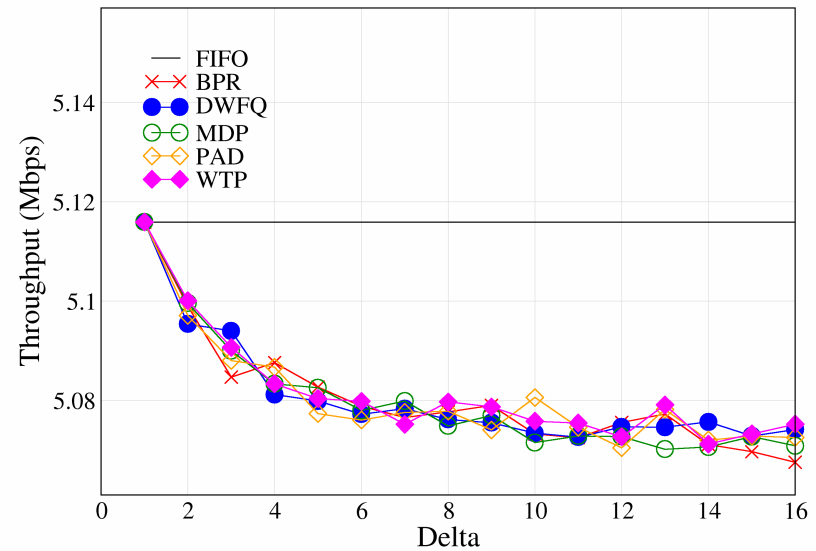
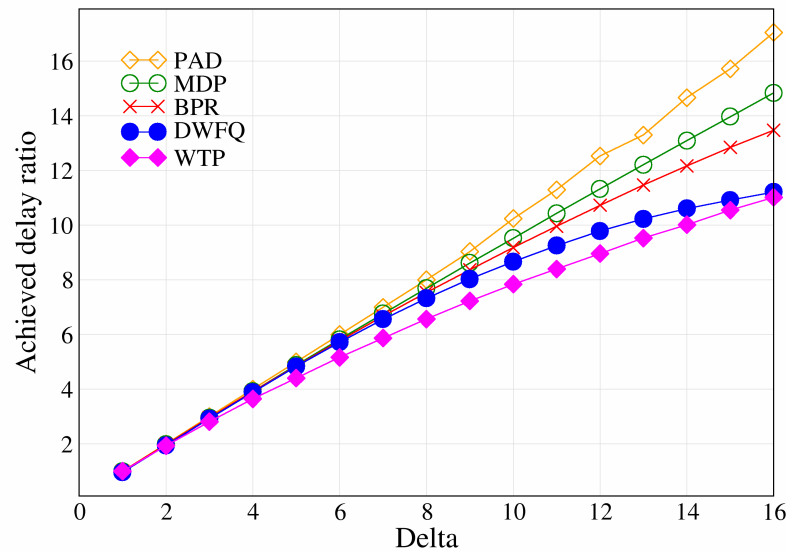


- Performanse TCP protokola zavise od kašnjenja i verovatnoće gubitaka paketa:

$$T(R, p) \sim \frac{k}{R\sqrt{p}}$$

- Raspoređivači za proporcionalnu diferencijaciju kašnjenja pružaju servis malog kašnjenja za real-time aplikacije po cenu povećanog kašnjenja za TCP pakete.

Primer uticaja različitih raspoređivača na protok TCP paketa



PAD: Proportional Average Delay
MDP: Mean-Delay Proportional
BPR: Backlog Proportional Rate
DWFQ: Dynamic Weighted Fair Queuing
WTP: Waiting-Time Priority

- Protok TCP paketa je manji nego u slučaju best-effort servisa.
- Potreban je dodatni mehanizam koji će zaštititi TCP aplikacije od degradacije performansi.



Sadržaj prezentacije

- Uvod i motivacija
- Kvalitet servisa (QoS) na Internetu
- Postojeći predlozi arhitektura za fleksibilne servise
- Predlog nove arhitekture za fleksibilne servise
- **Packet Loss Controller (PLC)**
- Rezultati simulacija
- Zaključak i otvoreni problemi



Packet Loss Controller

- Pri diferencijaciji **kašnjenja** BPR raspoređivačem, PLC reguliše **verovatnoću odbacivanja** TCP paketa u baferu.
- Cilj PLC-a je da obezbedi barem isti protok za TCP pakete kao u slučaju best-effort servisa.
- Aplikacije za prenos podataka (TS klasa) koriste TCP kao transportni protokol.
- TCP paketi čine preko 95% saobraćaja na Internetu.
- Rešenja koja ne uzimaju u obzir uticaj mehanizama za diferencijaciju servisa na TCP su neprihvatljiva u praksi.



Packet Loss Controller

- Pretpostavimo da je protok TCP paketa u slučaju best-effort servisa:

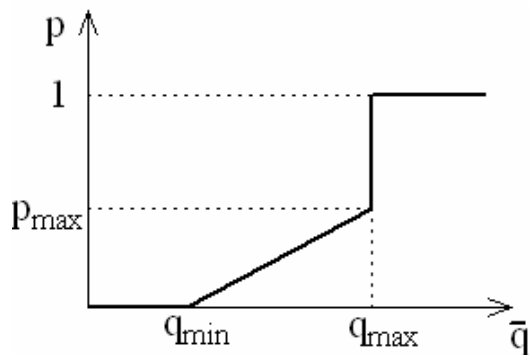
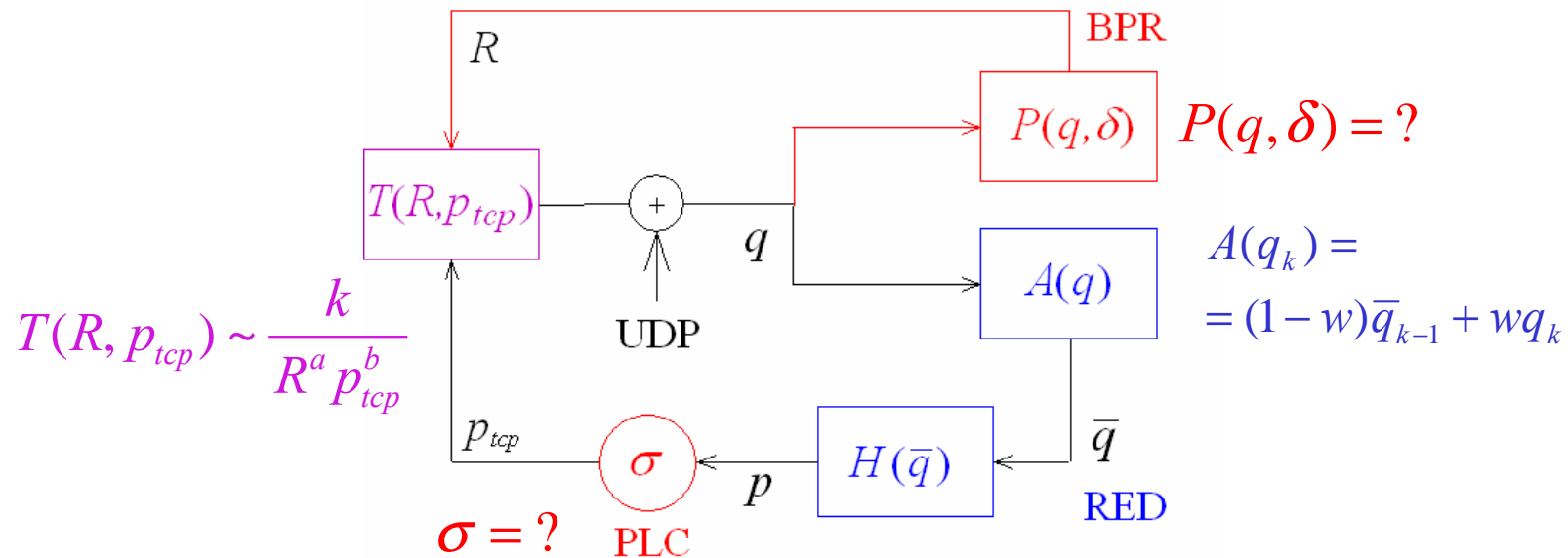
$$T(R, p) \sim \frac{k}{R^a p^b}$$

- Uticaj povećanog kašnjenja R može se kompenzovati smanjivanjem verovatnoće gubitaka p :

$$p_{tcp} = \sigma p, \quad 0 \leq \sigma \leq 1$$

- TCP paketi koje je RED sa verovatnoćom p označio za odbacivanje, prihvataju se u bafer sa verovatnoćom $1-\sigma$.
- Umesto prihvaćenih TCP paketa, iz bafera se odbacuje odgovarajući broj UDP paketa.

TCP, RED, BPR i PLC: sistem sa povratnom spregom



$$H(\bar{q}) = \begin{cases} 0 & \text{if } \bar{q} \leq q_{min} \\ \frac{\bar{q} - q_{min}}{q_{max} - q_{min}} p_{max} & \text{if } q_{min} < \bar{q} < q_{max} \\ 1 & \text{if } \bar{q} \geq q_{max} \end{cases}$$

Postupak određivanja parametra σ



- Da bi PLC obezbedio barem isti protok za TCP pakete kao u slučaju best-effort servisa, σ mora da zadovolji:

$$\frac{1}{R^a (\sigma p)^b} \geq \frac{1}{R'^a p'^b}$$

gde su R' i p' round-trip kašnjenje i verovatnoća gubitaka u slučaju best-effort servisa.

- Preuređivanjem dobijamo: $\sigma \leq \frac{p'}{p} \left(\frac{R'}{R} \right)^x$, gde je $x=a/b$.
- Količnici R'/R i p'/p definišu opseg σ koji zadovoljava uslove predložene arhitekture.



R : round-trip kašnjenje TCP paketa

- $P(q, \delta) = R$ je suma kašnjenja transmisije, propagacije i čekanja u baferu.
- Uvodimo dve pretpostavke:
 - zagušenje se javlja na samo jednom segmentu linka
 - kašnjenja transmisije i propagacije su zanemarljiva u odnosu kašnjenje u baferu.
- Na osnovu učestanosti servisiranja BPR raspoređivača* dobijamo:

$$R \approx \frac{q}{r_{tcp} + \frac{r_{udp}}{\delta}}$$

$$* \frac{r_{TS}}{r_{DS}} = \frac{1}{\delta} \frac{q_{TS}}{q_{DS}}$$



R'/R : odnos round-trip kašnjenja

- Na sličan način se dobija round-trip kašnjenje R' u slučaju best-effort servisa:

$$R' \approx \frac{q'}{C}$$

- Na osnovu dobijenih izraza za R' i R dobijamo:

$$\frac{R'}{R} = \left(\frac{q'}{q} \right) \eta$$

gde je $\eta = \frac{r_{tcp} + \frac{r_{udp}}{\delta}}{C}$



p'/p : odnos verovatnoća gubitaka

- Ako je λ intenzitet UDP saobraćaja, p_{udp} verovatnoća gubitaka UDP paketa i C kapacitet linka, onda:

$$T + (1 - p_{udp})\lambda = C$$

- Slično, u slučaju best-effort servisa $T' + (1 - p')\lambda = C$
- Na osnovu prethodne dve relacije dobijamo:

$$\frac{p'}{p} = \frac{r_{udp}(1 - \sigma_0 p) + r_{tcp}(1 - \sigma_0)}{r_{udp}(1 - \sigma_0 p) + r_{tcp}(1 - \sigma_0)p}$$

gde je $\sigma_0 = \frac{p'}{p} \left(\frac{R'}{R} \right)^x$ vrednost σ za koju $T = T'$.



Izbor parametra σ_0

$\bar{q} \leq q_{\min}$	$q_{\min} < \bar{q} < q_{\max}$	$\bar{q} \geq q_{\max}$
$p_{tcp} = \sigma_0 p$ $p = 0 \Rightarrow p_{tcp} = 0$ σ_0 je irrelevantno	$\sigma_0 \approx \frac{1 + (1 + \gamma x) \frac{r_{tcp}}{r_{udp}}}{\frac{1}{\eta^x} + (1 + \gamma x) \frac{r_{tcp}}{r_{udp}}}$ $\gamma = \frac{p}{p + \xi}$ $\xi = \frac{p_{\max} q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}}$	$\sigma_0 \approx \eta^x$ $\eta = \frac{r_{tcp} + \frac{r_{udp}}{\delta}}{C}$ $x = \frac{a}{b}$

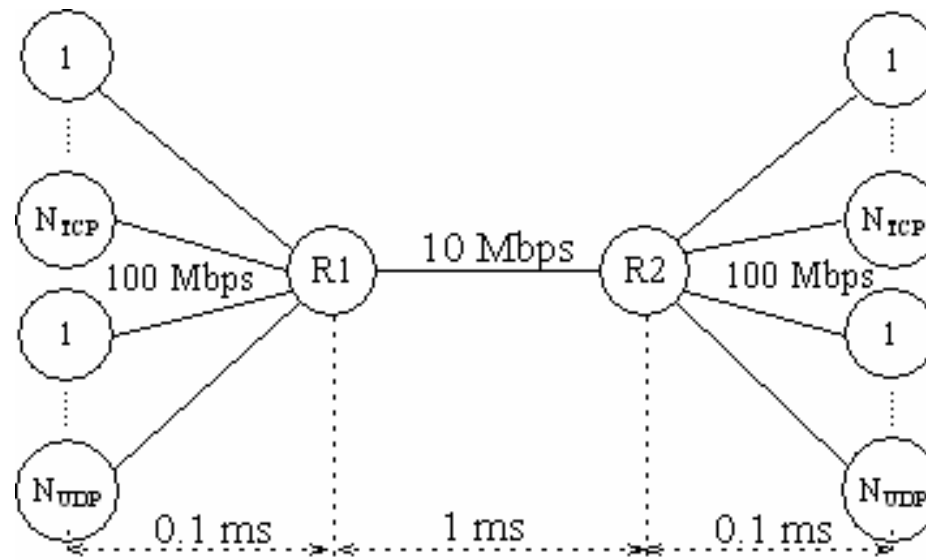


Sadržaj prezentacije

- Uvod i motivacija
- Kvalitet servisa (QoS) na Internetu
- Postojeći predlozi arhitektura za fleksibilne servise
- Predlog nove arhitekture za fleksibilne servise
- Packet Loss Controller (PLC)
- **Rezultati simulacija**
- Zaključak i otvoreni problemi

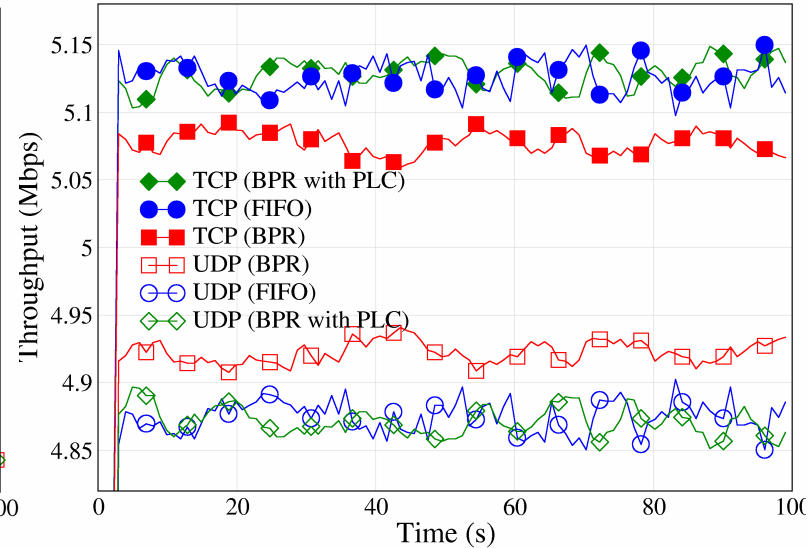
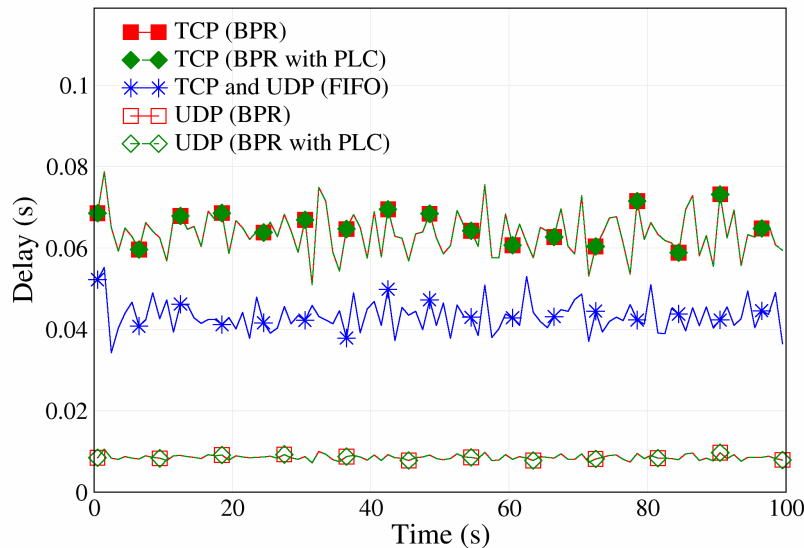


Topologija simulirane mreže



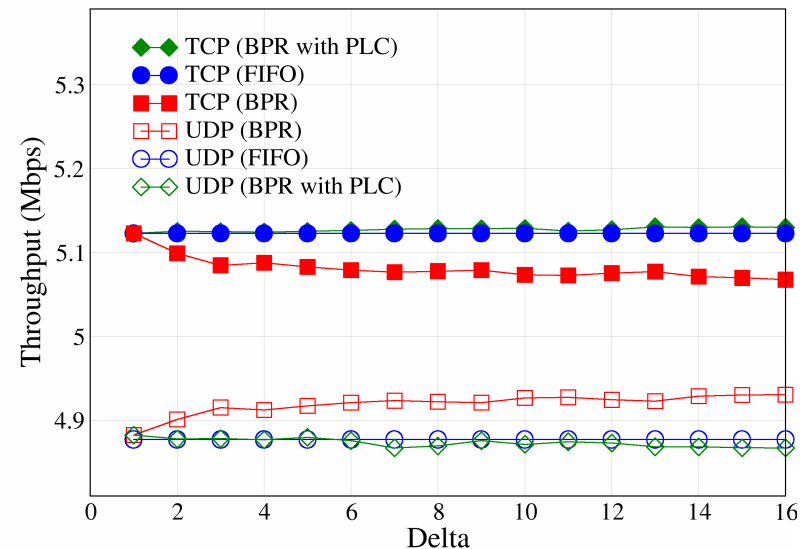
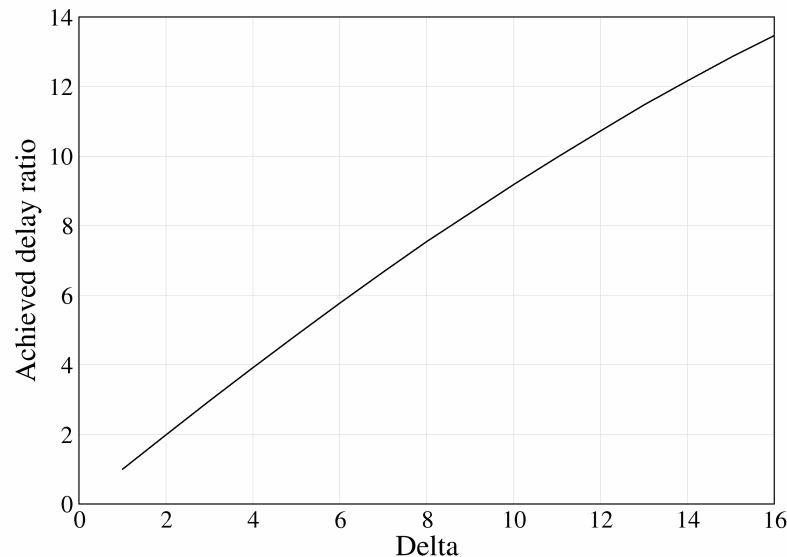
- Broj izvora: $N_{TCP} = 10$, $N_{UDP} = 10$
- Veličina paketa: 500 bajta
- Veličina bafera: 250 paketa
- RED parametri: $q_{min} = 60$, $q_{max} = 180$, $p_{max} = 0.1$, $w = 0.002$

Scenario 1: vremenski dijagrami kašnjenja i protoka



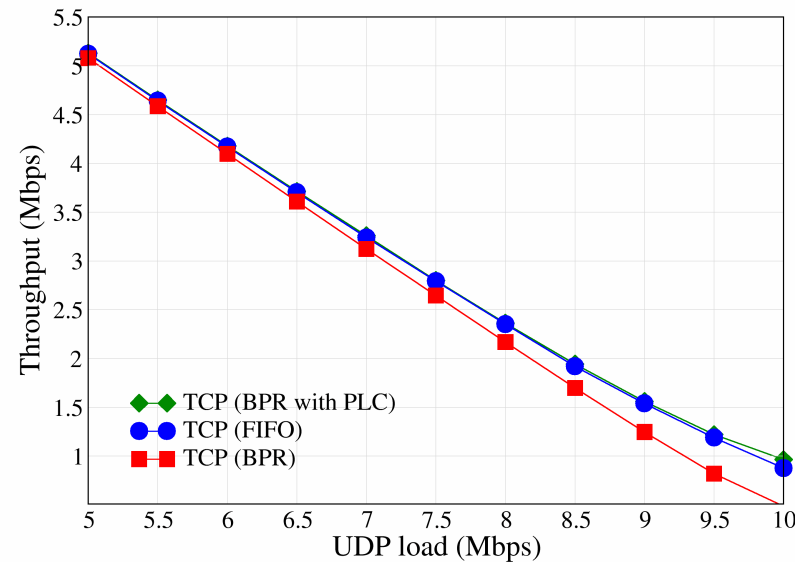
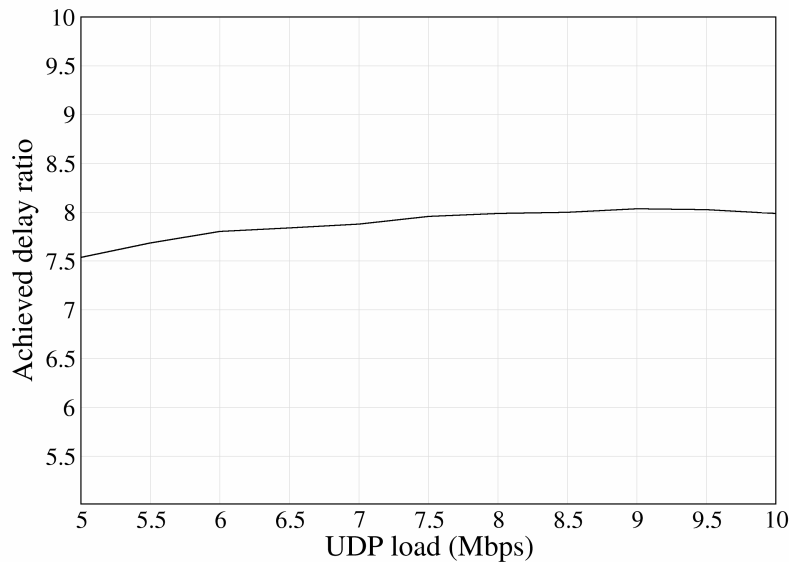
- Parametri simulacije: $\delta=8$, $\lambda_{UDP}=5$ Mbps
- Ostvareni odnos kašnjenja je blizak zadatom parametru δ .
- Diferencijacija kašnjenja smanjuje protok TCP paketa.
- PLC mehanizam otklanja negativne posledice po protok TCP paketa, a pri tom ne utiče na ostvareni odnos kašnjenja.

Scenario 2: uticaj parametra kašnjenja δ



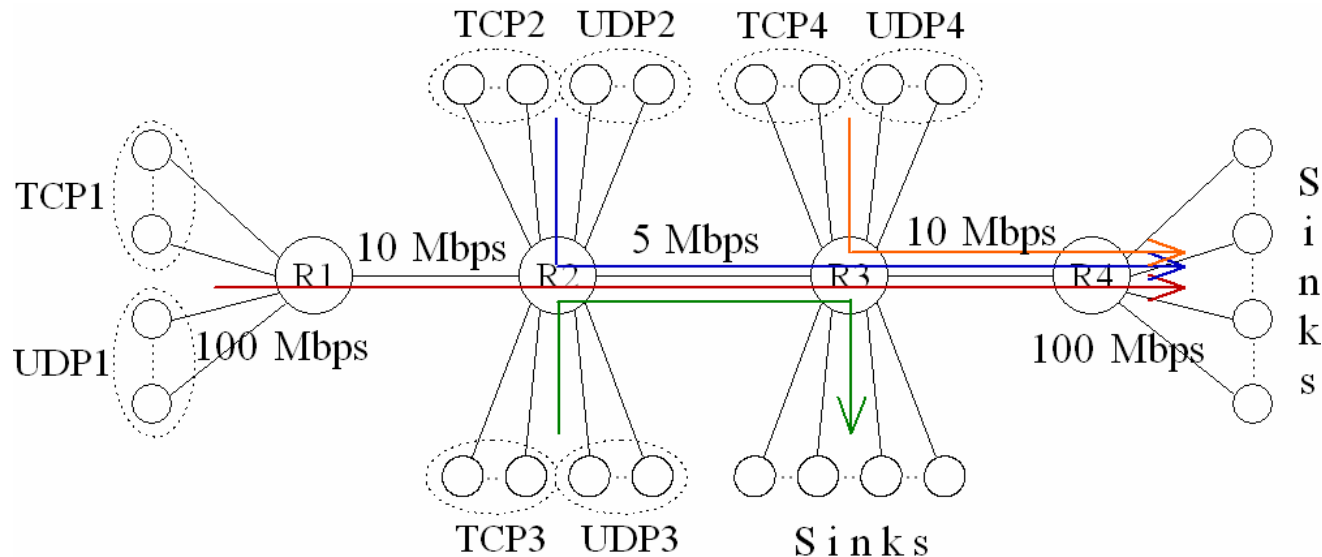
- Parametri simulacije: $1 \leq \delta \leq 16$, $\lambda_{\text{UDP}} = 5$ Mbps
- Fleksibilni servisi ne pružaju striktno garancije: postignuti odnos kašnjenja opada kada δ raste (feasibility problem).
- Uticaj diferencijacije kašnjenja na protok TCP paketa se povećava sa porastom δ .
- PLC uspešno reguliše protok TCP paketa za sve vrednosti δ .

Scenario 3: uticaj intenziteta ponuđenog UDP saobraćaja



- Parametri simulacije: $\delta=8$, $5 \text{ Mbps} \leq \lambda_{\text{UDP}} \leq 10 \text{ Mbps}$
- Diferencijacija kašnjenja je preciznija pri intenzivnom saobraćaju.
- Kada mreža nije zagušena diferencijacija kašnjenja nije potrebna.
- Bez obzira na intenzitet UDP saobraćaja, PLC štiti TCP aplikacije od degradacije protoka i ublažava "starvation" efekat.

Scenario 4: uticaj topologije mreže



- Ponuđeni saobraćaj: 4 grupe od po 25 TCP i 25 UDP konekcija
- Parametri simulacije: $\delta=4$, $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 1.25$ Mbps
- Predložena arhitektura pruža diferencijaciju servisa na **lokalnom segmentu** linka.
- Iz perspektive korisnika, “**end-to-end**” performanse su indikatori kvaliteta servisa.

Scenario 4: Uticaj topologije mreže - rezultati



	FIFO		BPR			BPR with PLC		
	T (Mb/s)	d_{tcp}/d_{udp}	T (Mb/s)	Diff. (%)	d_{tcp}/d_{udp}	T (Mb/s)	Diff. (%)	d_{tcp}/d_{udp}
TCP ₁	0,3594	0,9961	0,3312	-7,8464	3,7970	0,3748	+4,2849	3,9255
TCP ₂	0,4166	0,9957	0,3753	-9,9136	3,8391	0,4331	+3,9606	3,9682
TCP ₃	0,5979	0,9937	0,5801	-2,9771	3,8683	0,6159	+3,0105	4,0134
TCP ₄	5,6269	0,9992	5,5189	-1,9194	3,7073	5,6940	+1,1925	3,7402

- Diferencijacija kašnjenja na **lokalnom segmentima** linka rezultira željenim odnosom **"end-to-end"** kašnjenja δ .
- Pri odabiru PLC parametra σ pretpostavili smo slučaj kada je zagušen samo jedan segment na linku: **"single-bottleneck"**.
- Rezultati simulacija ukazuju na to da i u **"multiple-bottleneck"** slučaju PLC pruža barem isti protok za TCP pakete kao best-effort servis.



Sadržaj prezentacije

- Uvod i motivacija
- Kvalitet servisa (QoS) na Internetu
- Postojeći predlozi arhitektura za fleksibilne servise
- Predlog nove arhitekture za fleksibilne servise
- Packet Loss Controller (PLC)
- Rezultati simulacija
- Zaključak i otvoreni problemi



Zaključak



- Fleksibilni servisi predstavljaju novi koncept diferencijacije servisa na Internetu.
- Postojeće arhitekture za fleksibilne servise nisu direktno primenljivi na TCP.
- Predstavili smo novu arhitekturu za fleksibilne servise koja otklanja ovaj nedostatak.
- Predložena arhitektura se sastoji iz dva mehanizma:
 - Backlog Proportional Rate (BPR)
 - Packet Loss Controller (PLC)
- BPR i PLC zajedno čine "TCP-friendly" mehanizam za proporcionalnu diferencijaciju kašnjenja.
- Nizom simulacionih scenarija demonstrirali smo efikasnost predloženog rešenja.



Doprinos teze

- Pretstavljena je nova arhitektura za fleksibilne servise.
- Pretstavljen je Packet Loss Controller — novi mehanizam za kontrolu odbacivanja paketa u baferu.
- Doprinos boljem razumevanju složene interakcije koja postoji između mehanizama za diferencijaciju servisa i TCP protokola
- Noviteti u odnosu na rešenja koja se sreću u literaturi:
 - u mehanizmu za diferencijaciju kašnjenja (raspoređivača paketa) uzimaju se u obzir osobine protokola koji se koriste za transport paketa
 - QoS mehanizmi u ruteru se posmatraju i analiziraju kao sistem sa povratnom spregom



Otvoreni problemi

- Analitički postupka za odabir parametara predložene arhitekture u slučajevima kada:
 - vreme propagacije paketa nije zanemarljivo
 - postoji veći broj zagušenih segmenata linka
 - real-time aplikacije koriste adaptivne (TCP-friendly) protokole
- Definisati strategiju pomoću koje bi aplikacija vršila odabir odgovarajuće klase servisa.
- "Feasibility" studija BPR raspoređivača koja bi definisala opseg ostvarivih odnosa kašnjenja δ .
- Uključiti postojeće AQM* algoritame za eliminisanje "starvation" efekta u predloženo rešenje.

*Active Queue Management



Literatura



- [1] B. Teitelbaum, "Future priorities for Internet2 QoS," Internet2 QoS WG, October 2001. Available at: <http://www.internet2.edu/qos/wg/papers/qosFuture01.pdf>.
- [2] H. J. Chao and X. Guo, *Quality of service control in high-speed networks*. New York: John Wiley and Sons, 2002.
- [3] V. Firoiu, J.-Y. Le Boudec, D. Towsley, and Z.-L. Zhang, "Theories and models for Internet quality of service," *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 9, pp. 1565-1591, September 2002.
- [4] P. Gevros, J. Crowcroft, P. Kirstein, and S. Bhatti, "Congestion control mechanisms and the best-effort service model," *IEEE Network*, vol. 15, no. 3, pp. 16-26, May 2001.
- [5] P. Hurley, J. Y. Le Boudec, and P. Thiran, "ABE: providing a low-delay service within best effort," in *IEEE Network Magazine*, vol. 15, no. 3, May 2001.
- [6] V. Firoiu and X. Zhang, "Best Effort Differentiated Services: trade-off service differentiation for elastic applications," in *Proceedings of IEEE ICT'01*, Bucharest, Romania, June 2001.
- [7] B. Gaidioz, P. Primet, and B. Tourancheau, "Differentiated fairness: model and implementation," in *Proceedings of IEEE HPSR'01*, Dallas, TX, May 2001, pp. 777-782.



Literatura



- [8] C. Dovrolis, D. Stiliadis, and P. Ramanathan, "Proportional differentiated services: delay differentiation and packet scheduling," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 10, pp. 12-26, February 2002.
- [9] J. Padhye, V. Firoiu, D. Towsley, and J. Kurose, "Modeling TCP Reno performance: a simple model and its empirical validation," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 8, no. 2, April 2000.
- [10] Y. Chen, C. Qiao, M. Hamdi, and D. H. K Tsang, "Proportional differentiation: a scalable QoS approach," *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 6, pp. 52-58, June 2003.
- [11] V. Vukadinović and Lj. Trajković, "RED with dynamic thresholds for improved fairness," in *Proceedings of ACM Symposium on Applied Computing (SAC 2004)*, Nicosia, Cyprus, March 2004, pp. 371-372.
- [12] N. Christin and J. Liebeherr, "A QoS architecture for quantitative service differentiation," *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 6, pp. 38-45 June 2003.
- [13] V. Vukadinović, G. Petrović, and Lj. Trajković, "BPR⁺: a packet scheduling algorithm for proportional delay differentiation," in *Proceedings of YUINFO 2004*, Kopaonik, Serbia and Montenegro, March 2004.



Zahvalnica



Zeleo bih da se pre svih zahvalim svojim mentorima, prof. Ljiljani Trajković i prof. Grozdanu Petroviću, kao i članovima komisije, prof. Zoranu Petroviću i prof. Zoranu Bojkoviću.

Prof. Petroviću se zahvaljujem na podršci i savetima koje mi je pružao tokom celokupnih studija.

Prof. Trajković se zahvaljujem za vreme i naporan rad koji je uložila pomazući mi u izradi teze i gostoprimstvo koje mi je pružila u svojoj laboratoriji.

Zahvaljujem se i članovima CNL laboratorije, Nikoli Cackovu, Svetlani i Božidaru Vujičić i Nenadu Laskoviću za konstruktivne komentare i za sve prijatne trenutke koje smo proveli zajedno.



Pitanja

