

3. Principi telekomunikacionih mreža

Prof.dr Igor Radusinović

igorr@ucg.ac.me

Doc.dr Slavica Tomović

slavicat@ucg.ac.me

Principi telekomunikacionih mreža

- ❑ Dijeljenje resursa
- ❑ Performanse mreže
- ❑ Skalabilnost
- ❑ Aplikacije

Principi telekomunikacionih mreža

Dijeljenje resursa

Korisnici nijesu uvijek aktivni na mreži tako da neprekidna dodjela resursa nije efikasna!

Primjer

Hiljadu korisnika dijeli link kapaciteta C . Neka je jedan korisnik u prosjeku aktivan 1% vremena. To znači da je od 1000 korisnika prosječno aktivno svega 10. Prema tome svakom aktivnom korisniku u prosjeku je na raspolaganju kapacitet od $C/10$. To je 100 puta više od $C/1000$ koliko bi imao ukoliko bi svi korisnici bili aktivni. Vrijednost 100 predstavlja dobitak multipleksiranja i mjeri prednost koja se dobija dijeljenjem linka (resursa).

Principi telekomunikacionih mreža

Performanse

- ❑ Brzina prenosa
- ❑ Kapacitet linka
- ❑ Kašnjenje
- ❑ Gubici
- ❑ Propusnost
- ❑ Red čekanja
 - Stohastički procesi
 - Poasonov dolazni process
 - Markovljev lanac rađanja i umiranja
 - Little-ova formula
 - $M/M/1$

Principi telekomunikacionih mreža

Brzina prenosa

- ❑ Link se može okarakterisati brzinom prenosa, odnosno brojem bita koje link može prenijeti u jedinici vremena.
- ❑ Brzina od 100 Mb/s znači da predajnik može poslati 10000 bita za 0.1 ms.
- ❑ **Za koje vrijeme se može poslati 100MB?**
- ❑ Linkovi ne moraju imati identične brzine u oba smjera prenosa bita. Na primjer ADSL konekcija ima dvije brzine:
 - Uplink (nekoliko Mb/s)
 - Downlink (nekoliko desetina Mb/s)
- ❑ U praksi protokoli obavljajući funkcije telekomunikacione mreže mogu unositi dodatna kašnjenja u prenosu paketa tako da je stvarna brzina kojom se oni šalju uvijek manja od brzine prenosa linka.

Principi telekomunikacionih mreža

Kapacitet linka

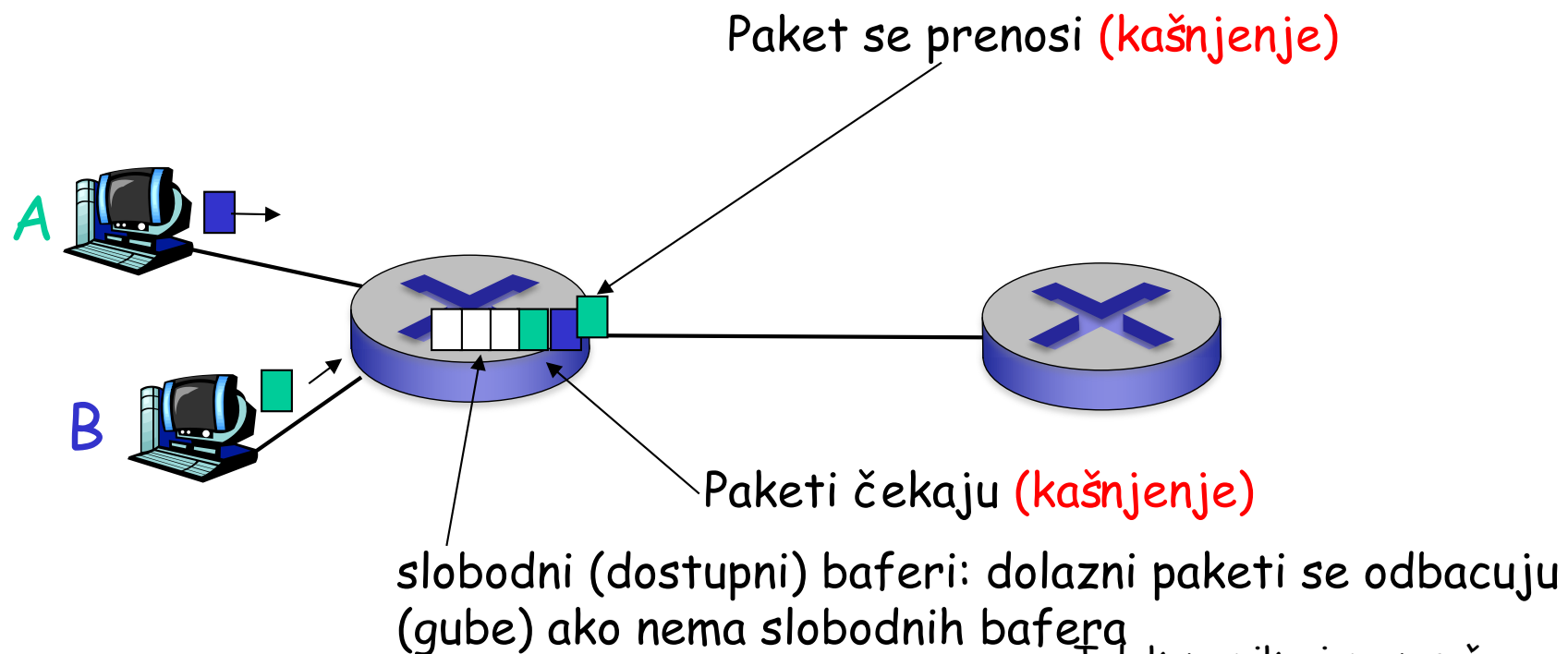
- ❑ Kapacitet linka zavisi od
 - Propusnog opsega linka
 - Nivoa šuma na linku
- ❑ Šenonova formula
 - $C = W \log_2(1 + SNR)$
 - W je propusni opseg linka
 - SNR je odnos snaga signala i šuma
 - C je Šenonov kapacitet linka
- ❑ Brzina prenosa linka je uvijek manja ili jednaka od kapaciteta linka koji predstavlja teorijski maksimalnu moguću brzinu prenosa na linku!

Principi telekomunikacionih mreža

Kašnjenje

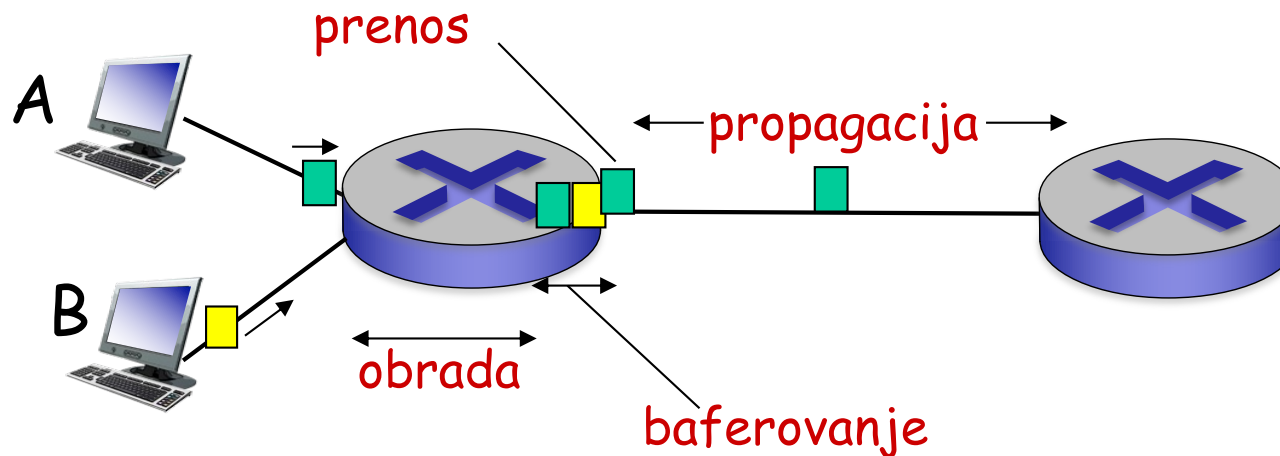
Paketi se smještaju u red čekanja (*queue*) u baferima rutera

- Dolazna brzina paketa može biti približna ili veća od kapaciteta odlaznog linka
- Paketi mogu čekati na slanje



Principi telekomunikacionih mreža

Kašnjenje



$$d = d_{\text{obrade}} + d_{\text{baferovanja}} + d_{\text{prenosa}} + d_{\text{propagacije}}$$

d_{obrada} : obrada paketa

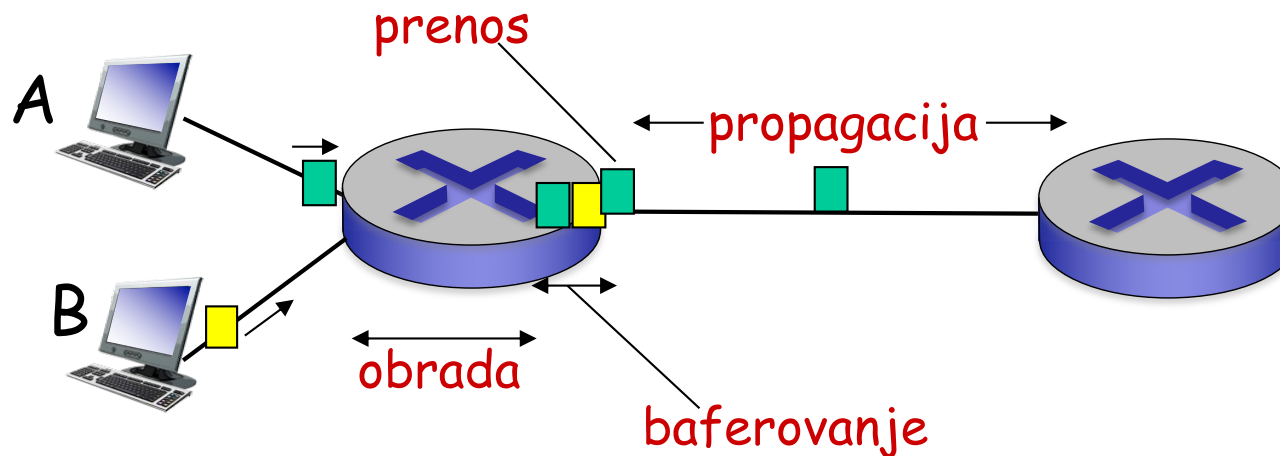
- Provjera greške
- Izbor izlaznog linka
- Tipično je manja od ms

$d_{\text{baferovanje}}$: čekanje u baferu

- Vrijeme čekanja do odlaska na link
- Zavisí od nivoa zagušenja

Principi telekomunikacionih mreža

Kašnjenje



$$d = d_{\text{obrada}} + d_{\text{baferovanje}} + d_{\text{prenosa}} + d_{\text{propagacije}}$$

d_{prenosa} : kašnjenje uslijed prenosa: $d_{\text{propagacije}}$: kašnjenje uslijed propagacije:

- L : veličina paketa (b)
- R : kapacitet linka (b/s)

■ $d_{\text{prenosa}} = L/R$ ←

- d : dužina linka
- s : brzina svjetlosti ($\sim 2 \times 10^8$ m/s)

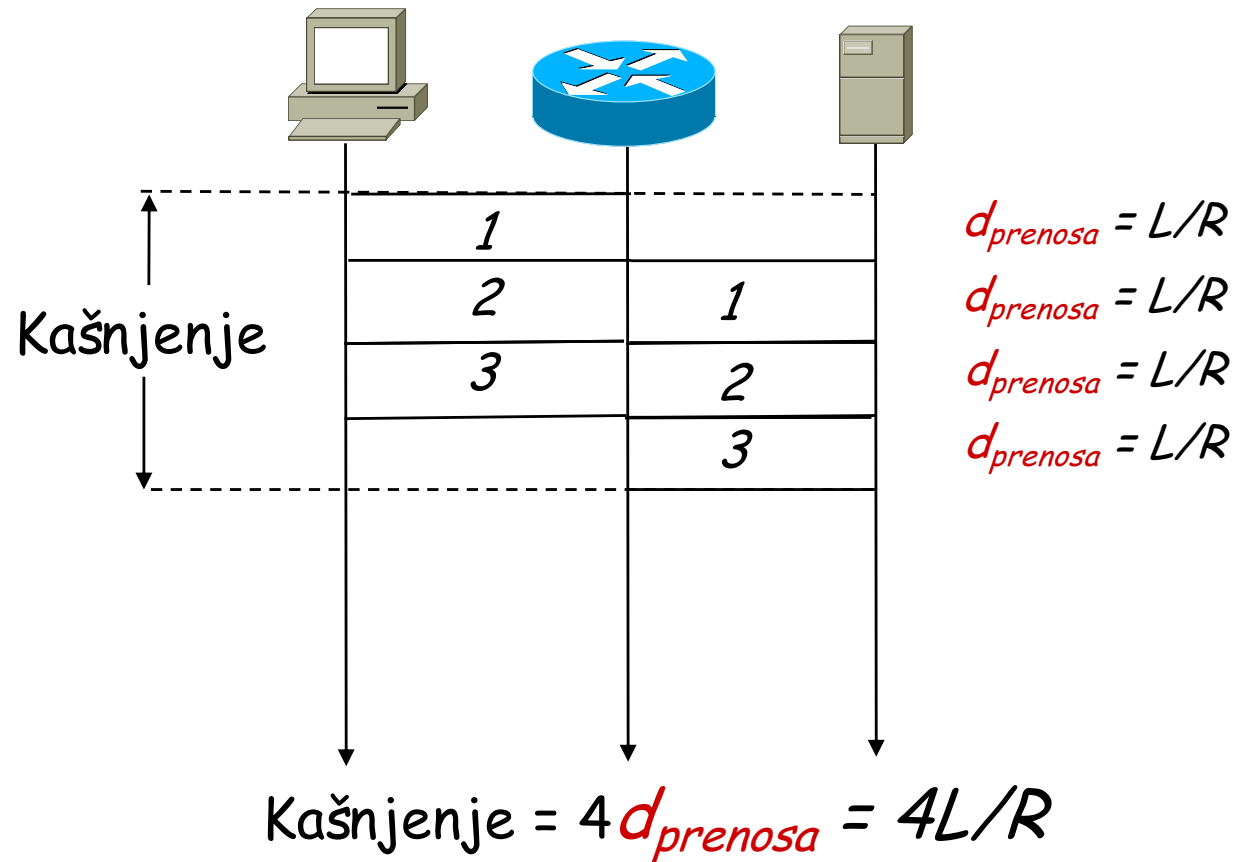
→ $d_{\text{propagacije}} = d/s$

d_{prenosa} i $d_{\text{propagacije}}$
se veoma razlikuju

Principi telekomunikacionih mreža

Kašnjenje

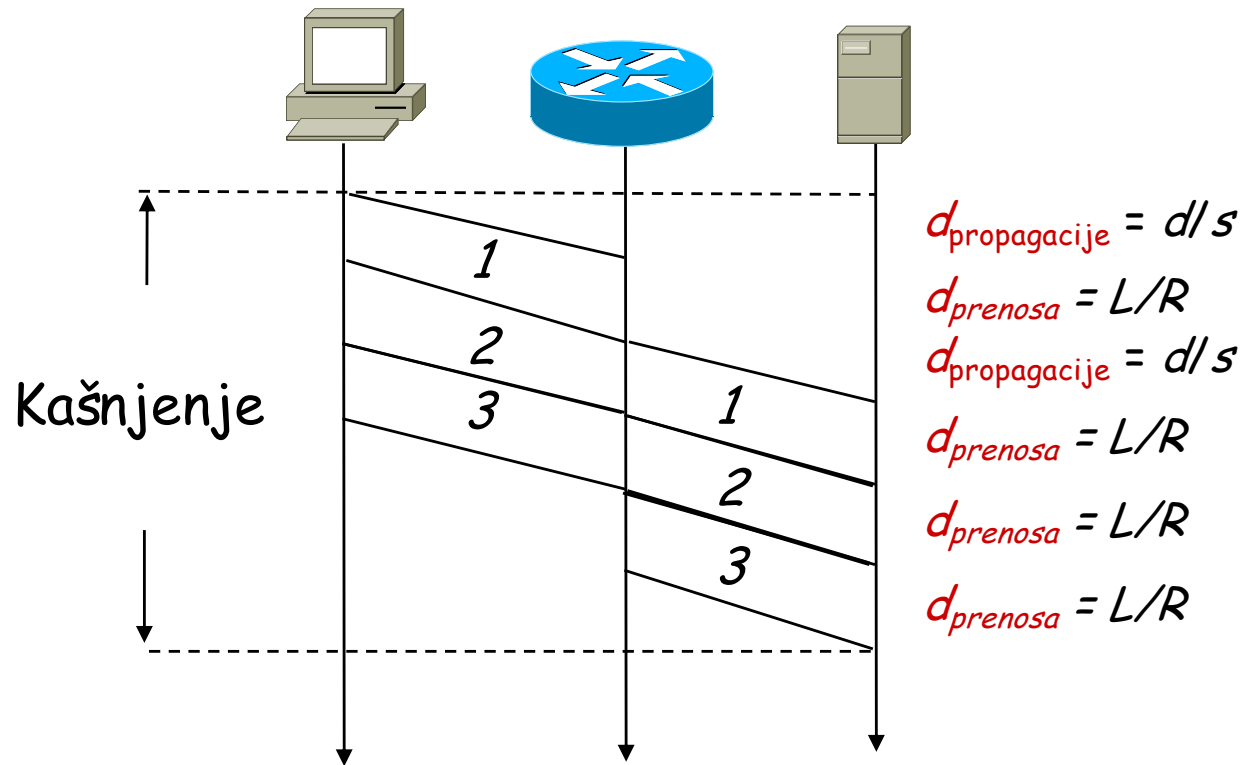
1. Postoji samo kašnjenje uslijed prenosa



Principi telekomunikacionih mreža

Kašnjenje

2. Postoje kašnjenje uslijed prenosa i kašnjenje uslijed propagacije (jednake brzine linkova, dužine i vrste medijuma)

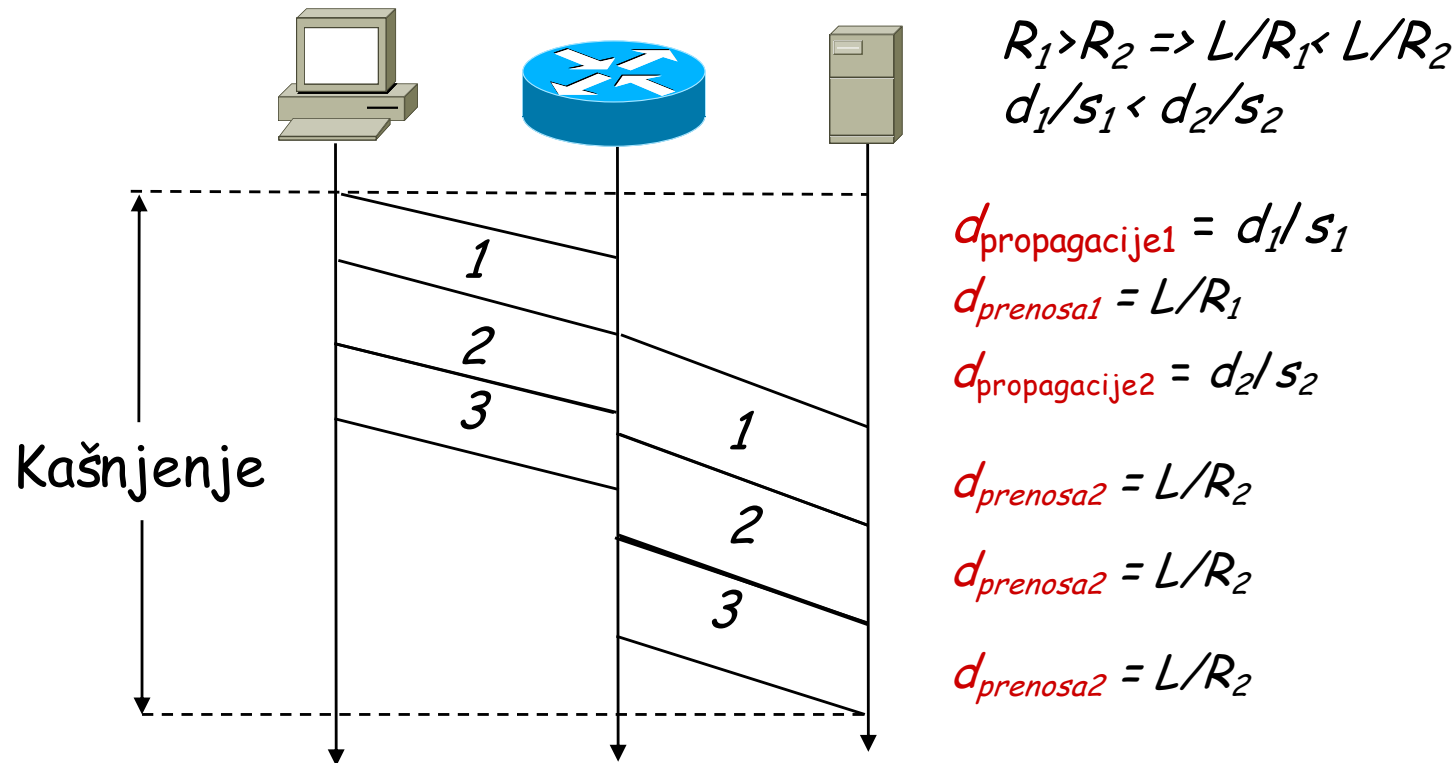


$$\text{Kašnjenje} = 4d_{\text{prenosa}} + 2d_{\text{propagacije}} = 4L/R + 2d/s$$

Principi telekomunikacionih mreža

Kašnjenje

3. Postoje kašnjenje uslijed prenosa i kašnjenje uslijed propagacije
(Različite brzine linkova, dužine i vrste medijuma)

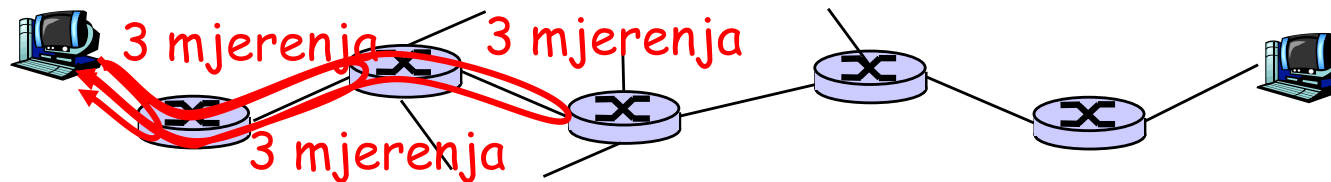


$$\text{Kašnjenje} = d_{\text{prenosa1}} + d_{\text{propagacije1}} + d_{\text{propagacije2}} + 3d_{\text{prenosa2}} = d_1/s_1 + L/R_1 + d_2/s_2 + 3L/R_2$$

Principi telekomunikacionih mreža

Kašnjenje

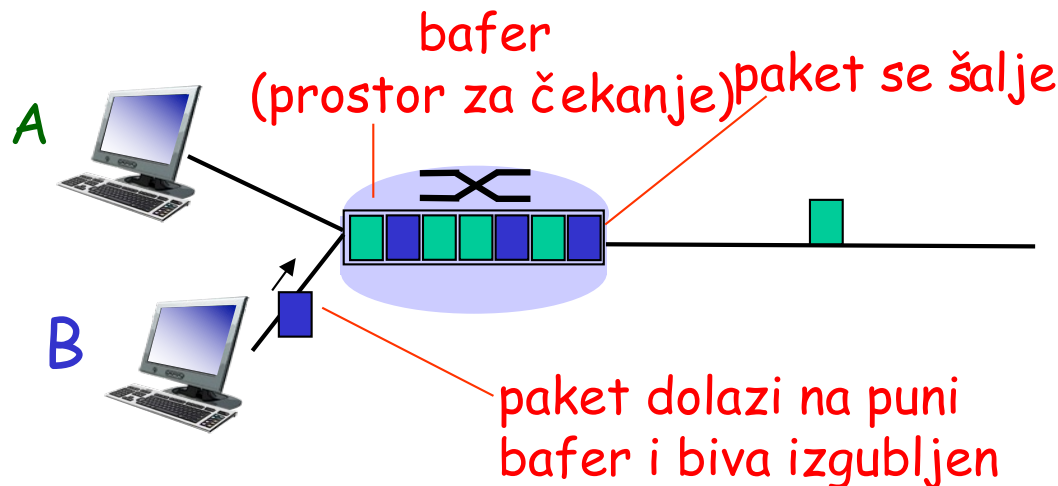
- ❑ Kako izgledaju “realna” Internet kašnjenja & gubici?
- ❑ **Traceroute**: daje mjerenja kašnjenja od izvora do rutera duž Internet puta od kraja izvora do kraja do destinacije. Za svako i :
 - šalje tri paketa koji će doći ruter i na putu do destinacije
 - ruter i će vratiti paket pošiljaocu
 - pošiljalac mjeri vrijeme između slanja i odgovora.



Principi telekomunikacionih mreža

Gubici

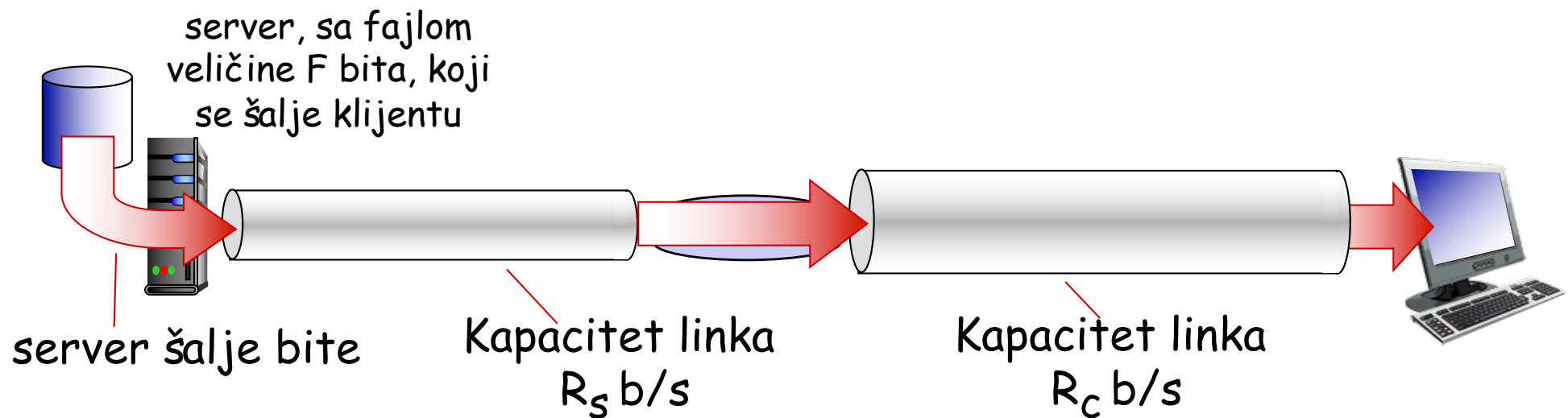
- ❑ Red čekanja (bafer) ima konačan kapacitet
- ❑ Kada paket dođe do popunjenog reda čekanja paket se odbacuje (gubitak)
- ❑ Izgubljeni paket se može ponovo poslati od strane prethodnog čvora, ili izvorišnog krajnjeg sistema ili se ponovo ne šalje



Principi telekomunikacionih mreža

Propusnost

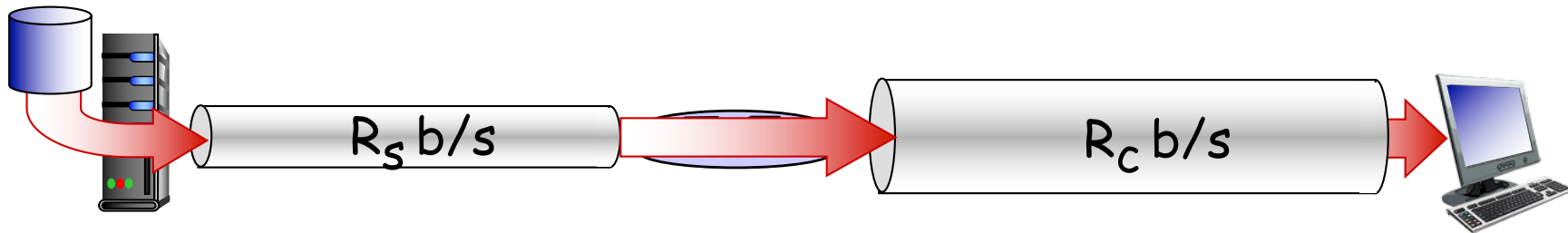
- ❑ *propusnost*: brzina (b/s) kojom se biti prenose od pošiljaoca do destinacije
 - *trenutna*: brzina u posmatranom trenutku
 - *srednja*: prosječna brzina tokom dužeg intervala



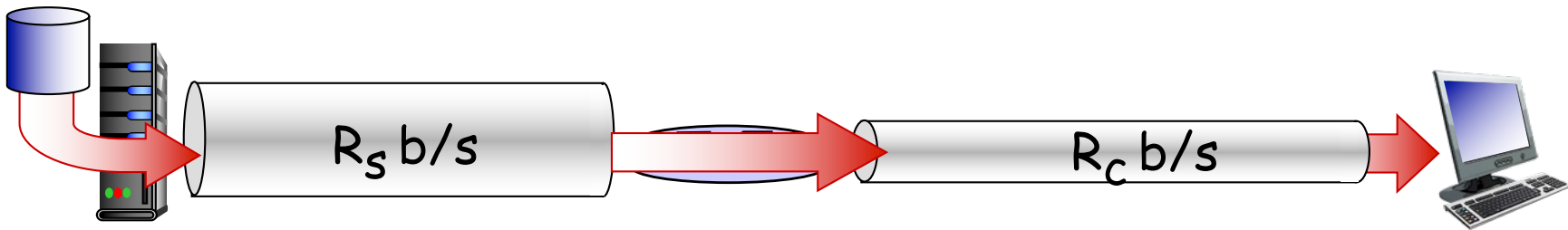
Principi telekomunikacionih mreža

Propusnost

- $R_s < R_c$ Koliko iznosi srednja propusnost od kraja do kraja?



- $R_s > R_c$ Koliko iznosi srednja propusnost od kraja do kraja?



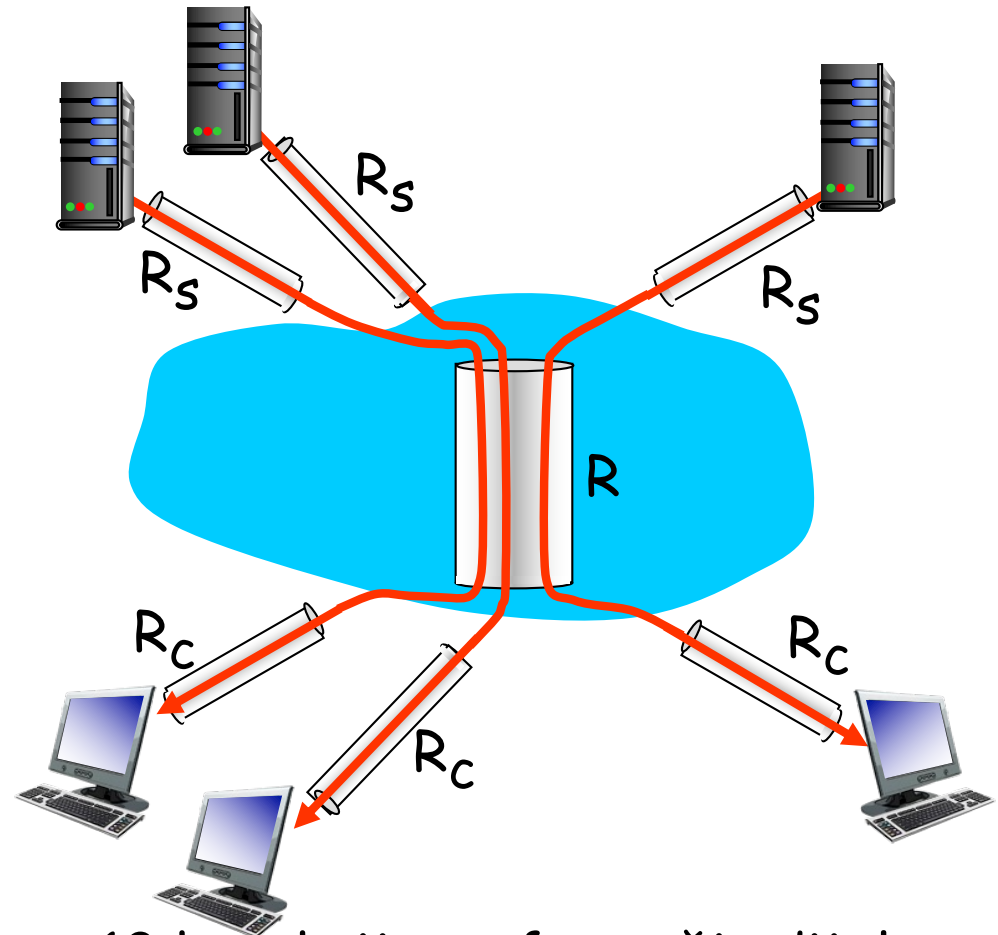
"bottleneck" link

link koji ograničava propusnost

Principi telekomunikacionih mreža

Propusnost

- Propusnost po konekciji:
 $\min(R_c, R_s, R/10)$
- U praksi: R_c ili R_s je obično "bottleneck"



10 konekcija na fer način dijele
"bottleneck" link okosnice
kapaciteta R b/s

Na propusnost utiču i protokoli!

Principi telekomunikacionih mreža

Red čekanja

U telekomunikacionim mrežama veoma često dolazi do kolizije vezane za određeni resurs. Tipični su primjeri:

- ❑ Različiti telefonski pozivi dolaze na telefonsku centralu koja ih mora usmjeriti prema ograničenom broju odlaznih linkova ili prema istim korisnicima telefonske centrale.
- ❑ Različiti paketi dolaze na različite ulaze komutatora paketa, a treba da budu proslijeđeni na isti izlaz.

Principi telekomunikacionih mreža

Red čekanja

Zahtjevi za zauzimanjem resursa telekomunikacione mreže mogu biti posledica jednog ili više procesa koji dijele isti prenosni resurs. Ako nema dovoljno resursa za ostvarivanje njihovog simultanog prenosa svi ovi slučajevi zahtijevaju formiranje redova čekanja paketa ili poziva.

Principi telekomunikacionih mreža

Red čekanja

Tipični problemi u kojima se koristi teorija redova čekanja su:

- ❑ Analiza performansi bafera na prenosnim kapacitetima i njihovo dimenzionisanje
- ❑ Planiranje mreže (planiranje kapaciteta prenosnih sistema koji povezuju mrežna čvorišta)
- ❑ Utvrđivanje performansi protokola kontrole pristupa mrežnom resursu za različite korisnike koji se za njega takmiče

Principi telekomunikacionih mreža

Red čekanja

- ❑ Specijalni slučaj stohastičkog procesa koji se opisuje stanjem $X(t)$
- ❑ Stanje $X(t)$ predstavlja broj zahtjeva (paketa ili poziva) smještenih u redu čekanja u trenutku t .
- ❑ Opisuje se sa
 - dolaznim procesom zahtjeva,
 - načinom izbora zahtjeva za posluživanje i
 - procesom posluživanja.

Principi telekomunikacionih mreža

Stohastički proces

- ❑ se identifikuje različitim raspodjelama slučajne promjenljive X u različitim trenucima vremena.
- ❑ opisuje se sa:
 - Prostorom stanja, koji predstavlja skup mogućih vrijednosti slučajne promjenljive $X(t)$. Ovaj prostor može biti
 - kontinualan ili
 - diskretan (u tom slučaju se stohastički proces zove lancem - chain).
 - Promjenljivom vremena koja pripada
 - kontinualnom ili
 - diskretnom skupu.
 - Korelacionim karakteristikama slučajne promjenljive $X(t)$ u različitim trenucima vremena.

Principi telekomunikacionih mreža

Stohastički proces

- Opisuje se funkcijom raspodjele koja se dobija kao združena raspodjela u različitim trenucima vremena t_i i za različite vrijednosti x_i .

$$F_X(x, t) = P(X(t_1) \leq x_1, X(t_2) \leq x_2, \dots, X(t_n) \leq x_n)$$

- Proces je stacionaran u striktnom smislu ako za bilo koje x , t i τ važi

$$F_X(x, t + \tau) = F_X(x, t)$$

Funkcija raspodjele vjerovatnoća je invarijantna na vremenske translacije

Principi telekomunikacionih mreža

Stohastički proces

- ❑ Proces je stacionaran u širem smislu ako srednja vrijednost $E[X(t)]$ ne zavisi od t , a korelacija $E[X(t) X(t+\tau)]$ ne zavisi od τ .
- ❑ Proces je nezavisan ako važi:

$$F_X(x, t) = P(X(t_1) \leq x_1) P(X(t_2) \leq x_2) \dots P(X(t_n) \leq x_n)$$

- ❑ Slična relacija važi za funkciju gustine raspodjele.
- ❑ Za nezavisan slučajan proces važi da su slučajne promjenljive u različitim trenucima vremena potpuno nekorelisane.

Principi telekomunikacionih mreža

Stohastički proces

- ❑ Specijalan slučaj stohastičkog procesa je Markovljev lanac kod kojeg slučajna promjenljiva uzima samo diskretne vrijednosti, pri čemu stanje $X[t_{n+1}]$ zavisi samo od stanja $X[t_n]$ u neposrednom prethodnom trenutku.
- ❑ Markovljev lanac se razvija u vremenu tranzicijama između stanja.
- ❑ Razvoj stohastičkog procesa se opisuje vrijednostima stanja u posmatranom trenutku, a ne u vremenu provedenom u tom stanju.
- ❑ Ova *memoryless* osobina je garantovana eksponencijalnom raspodjelom vremena boravka u određenom stanju za kontinualni lanac (geometrijska za diskretni lanac).
- ❑ Formalna definicija Markovljevog lanca kontinualnog u vremenu je:

$$\begin{aligned} P\left(X(t_{n+1}) = x_{n+1} \mid X(t_n) = x_n, X(t_{n-1}) = x_{n-1}, \dots, X(t_1) = x_1\right) = \\ = P\left(X(t_{n+1}) = x_{n+1} \mid X(t_n) = x_n\right) \end{aligned}$$

Principi telekomunikacionih mreža

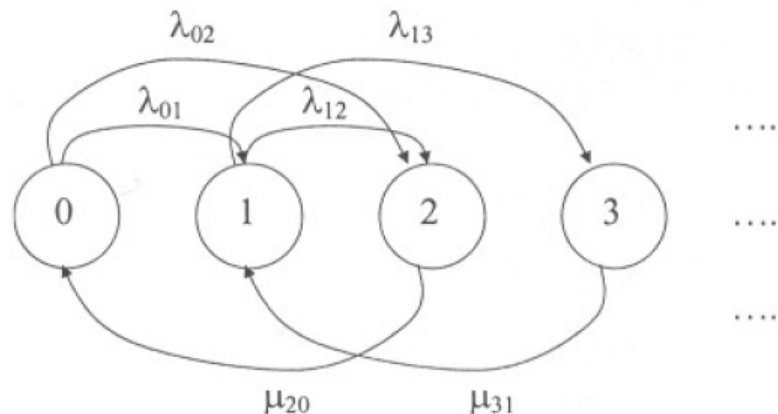
Stohastički proces

- ❑ U slučaju da su trenuci tranzicija diskretni, radi se diskretnom lancu.
- ❑ Važni Markovljevi lanci su:
 - Proces rađanja i umiranja (*birth and dead*), kod koga je iz stanja $X=i$, moguće preći samo u stanja $X=i+1$ ili $X=i-1$.
 - Procesi reprodukcije (*renewal*) koji predstavljaju dolazne procese čistog rađanja. Vremena između dva dolaska su nezavisna ali imaju identične raspodjele. Primjer je Poasonov dolazni proces kod kojeg vrijeme između dva dolaska ima eksponencijalnu raspodjelu, konstantnog parametra.
 - Semi-Markovljevi lanci su lanci kod kojih vrijeme boravka u određenom stanju ima opštu raspodjelu. Posmatranjem ovih lanaca u trenucima tranzicija stanja dobijamo *imbedded* Markovljev lanac, koji se može riješiti kao Markovljev lanac u diskretnom vremenu.

Principi telekomunikacionih mreža

Markovljev lanac

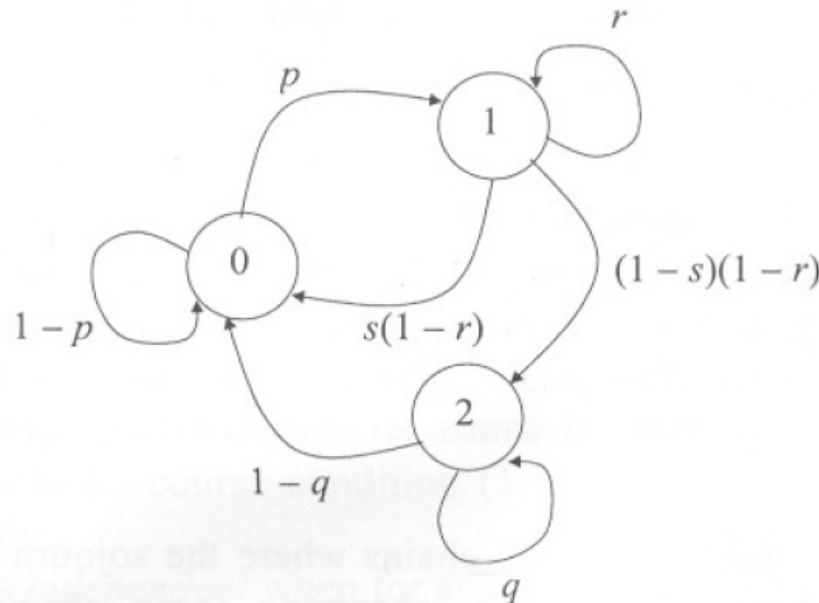
- ❑ Opisuje se dijagramima stanja koji se sastoje od stanja (kružići) i dozvoljenih tranzicija između njih (linije sa strelicama).
- ❑ Kod lanaca kontinualnih u vremenu tranzicija se može javiti u bilo kojem trenutku i opisane su parametrom eksponencijalne raspodjele.



Principi telekomunikacionih mreža

Markovljev lanac

- ❑ Kod lanaca diskretnih u vremenu tranzicija se može javiti u tačno definisanim trenucima i opisani su vjerovatnoćama tranzicija koje zavise od geometrijske raspodjele vremena zadržavanja u posmatranom stanju.
- ❑ U ovom slučaju stanja mogu imati tranziciju u same sebe.
- ❑ Suma svih vjerovatnoća napuštanja stanja mora biti jednaka 1.



Principi telekomunikacionih mreža

Poasonov dolazni proces

- Koristi se za opisivanje broja dolazaka N_t u intervalu t .
- Ako sa λ označimo srednju dolaznu brzinu, slučajna promjenljiva N_t modeluje Poasonov dolazni proces ako važi:

$$P(N_t = k) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} \quad \text{Za bilo koji interval } t$$

- Funkcija generisanja vjerovatnoća je

$$N_t(z) = \sum_{k=0}^{\infty} z^k \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} = e^{-\lambda t} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\lambda t z)^k}{k!} = e^{-\lambda t} e^{\lambda t z} = e^{\lambda t(z-1)}$$

$$E(N_t) = \left. \frac{dN_t(z)}{dz} \right|_{z=1} = \lambda t e^{\lambda t(z-1)} \Big|_{z=1} = \lambda t$$

$$E(N_t^2) = \left. \frac{d^2 N_t(z)}{dz^2} \right|_{z=1} + \left. \frac{dN_t(z)}{dz} \right|_{z=1} = (\lambda t)^2 e^{\lambda t(z-1)} \Big|_{z=1} + \lambda t e^{\lambda t(z-1)} \Big|_{z=1} = (\lambda t)^2 + \lambda t$$

$$\text{Var}(N_t) = E(N_t^2) - E(N_t)^2 = \lambda t$$

Principi telekomunikacionih mreža

Poasonov dolazni proces

$$IDC_t = \frac{Var(N_t)}{E(N_t)} \quad \text{indeks disperzivnosti}$$

- ❑ $IDC_t=1$ - Poasonova raspodjela
- ❑ $IDC_t<1$ - dolazni proces je uglačan (*smoothed*)
- ❑ $IDC_t>1$ - dolazni proces je šiljast (*peaked*)
- ❑ Što je manja vrijednost parametra više dolazaka se pojavljuje u regularnim intervalima.
- ❑ $IDC_t=0$ proces je deterministički.
- ❑ $IDC_t>1$, dolasci se pojavljuju u grupama (*bursts*). Ovi procesi izazivaju iznenadno punjenje reda čekanja i samim tim visoke vrijednosti srednjeg kašnjenja. Veće IDC, veće srednje kašnjenje.

Principi telekomunikacionih mreža

Poasonov dolazni proces

- Zanimljivo je razmotriti statistiku vremena između dolazaka t_a za Poasonov dolazni proces.
- Neka je $t=0$ trenutak poslednjeg dolaska.
- Vjerovatnoća da će sledeći dolazak biti u proizvoljnom trenutku t , je ekvivalentna da u intervalu $(0,t)$ nema dolazaka tj $e^{-\lambda t}$. Prema tome:

$$P(t_a > t) = e^{-\lambda t} \Leftrightarrow P(t_a \leq t) = 1 - e^{-\lambda t} \Leftrightarrow f_{t_a}(t) = \lambda e^{-\lambda t}, t \geq 0$$

- t_a ima eksponencijalnu raspodjelu srednje vrijednosti $1/\lambda$.
- Vremena između dolazaka su nezavisna i imaju identičnu eksponencijalnu raspodjelu!

Principi telekomunikacionih mreža

Primjena Poasonovog dolaznog procesa

Modelovanje dolaska:

- ❑ novih poziva na telefonsku centralu u mreži sa komutacijom kola.
- ❑ novih Web sesija za posmatranog ISPa ili korisnika.
- ❑ email poruka u mreži sa komutacijom paketa.
- ❑ paketa u slučajnim i neslučajnim protokolima pristupa.

Principi telekomunikacionih mreža

Poasonov dolazni proces

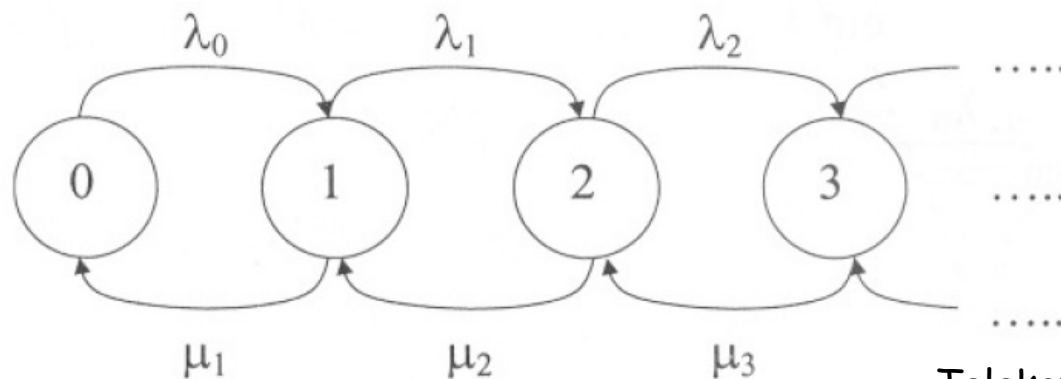
Osobine

- Suma nezavisnih procesa je Poasonov proces čija je srednja brzina jednaka sumi srednjih brzina nezavisnih procesa.
- Ako se Poasonov dolazni proces srednje dolazne brzine λ razdvaja (na slučajan način) na n različitih puteva sa vjerovatnoćama p_i ($i=1,2,...,n$) na svakom putu će postojati Poasonov proces srednje brzine λp_i
- ...

Principi telekomunikacionih mreža

Markovljev lanac rađanja i umiranja

- Markovljevi lanci kontinualni u vremenu koji opisuju ponašanje "populacije" čije stanje je prikazano prirodnim brojevima.
- Za posmatrano stanje k , dozvoljene su tranzicije samo u $k+1$ ili $k-1$.
- λ_i je srednja brzina rađanja iz stanja i u stanje $i+1$
- μ_m je srednja brzina umiranja iz stanja m u stanje $m-1$.
- P_n je vjerovatnoća da se lanac nalazi u stanju n .



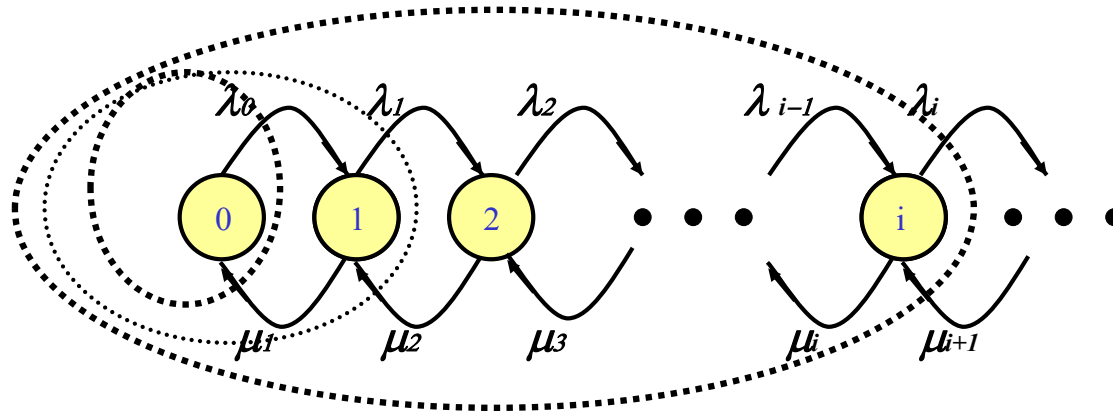
Principi telekomunikacionih mreža

Markovljev lanac rađanja i umiranja

- ❑ Vremensko ponašanje ovog lanca je opisano Kolmogorov-Chapmanovim jednačinama.
- ❑ U analizi performansi telekomunikacionih mreža od interesa su karakteristike lanca u ravnoteži, ako ona postoji.
- ❑ Dovoljan uslov da postoji ravnoteža je uslov ergodičnosti
 - $\exists$ indeks k_0 tako da za $\forall k \geq k_0$ važi $\frac{\lambda_k}{\mu_k} < 1$
- ❑ Fizički smisao je da postoji stanje u kome je brzina rađanja manja od brzine umiranja.
- ❑ Ovaj lanac se može riješiti korišćenjem zakona o održanju fluksa.
- ❑ Treba kreirati na pogodan način zatvorene površine i primijeniti ovaj zakon.

Principi telekomunikacionih mreža

Markovljev lanac rađanja i umiranja



Dijagram stanja za proces rađanja i umiranja

□ Ako se naprave balansne jednačine za svaki presjek dobija se:

$$\lambda_0 P_0 = \mu_1 P_1 \Rightarrow P_1 = \frac{\lambda_0}{\mu_1} P_0$$

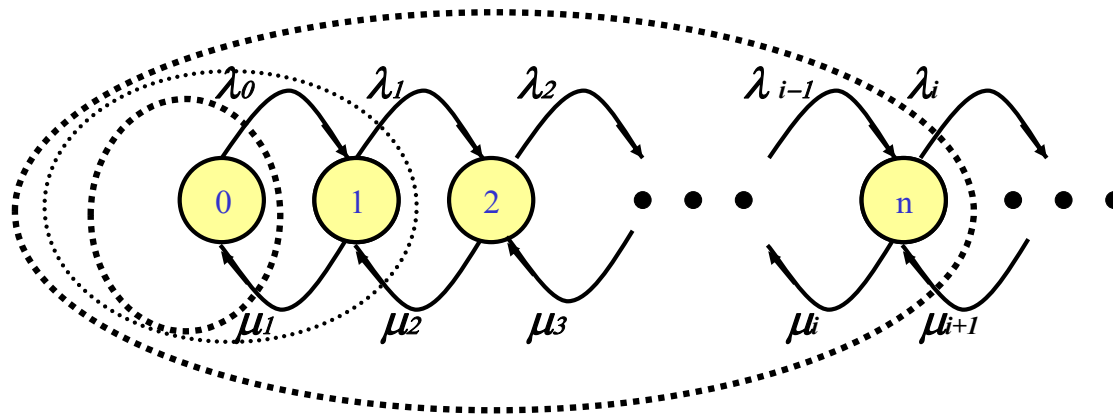
$$\lambda_1 P_1 = \mu_2 P_2 \Rightarrow P_2 = \frac{\lambda_1}{\mu_2} P_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_2} \frac{\lambda_0}{\mu_1} P_0$$

...

$$\lambda_{i-1} P_{i-1} = \mu_i P_i \Rightarrow P_i = \frac{\lambda_{i-1}}{\mu_i} P_{i-1} = P_0 \prod_{n=1}^i \frac{\lambda_{n-1}}{\mu_n}, \forall i \geq 1$$

Principi telekomunikacionih mreža

Markovljev lanac rađanja i umiranja

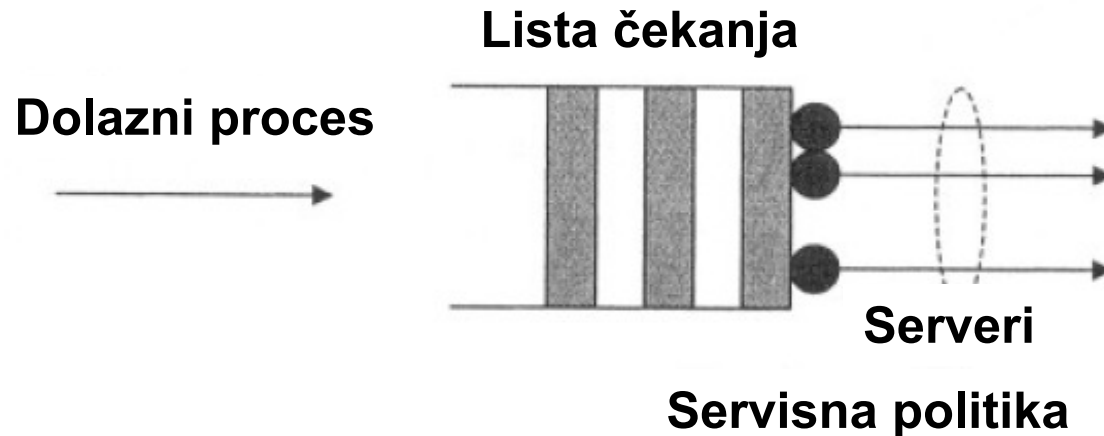


Dijagram stanja za proces rađanja i umiranja

$$\sum_{i=0}^{\infty} P_i = 1 \Rightarrow P_0 \sum_{i=0}^{\infty} \frac{P_i}{P_0} = 1 \Rightarrow P_0 \left(1 + \sum_{i=1}^{\infty} \prod_{n=1}^i \frac{\lambda_{n-1}}{\mu_n} \right) = 1 \Rightarrow P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{\infty} \prod_{n=1}^i \frac{\lambda_{n-1}}{\mu_n}}$$

Principi telekomunikacionih mreža

Notacija za redove čekanja



- ❑ Kendalova notacija iz 1953
- ❑ $A/B/C/D/E$
- ❑ A je tip dolaznog procesa (M - Poasonov proces, GI - dolazni proces reprodukcije)
- ❑ B je statistika vremena posluživanja (M - eksponencijalna raspodjela, G - opšta raspodjela)
- ❑ C - je broj servera
- ❑ D - broj mjesta u redu čekanja
- ❑ E - broj izvora koji generišu saobraćaj

Principi telekomunikacionih mreža

Notacija za redove čekanja

□ Servisna politika

- First Input First Out (FIFO)
- Last Input First Out (LIFO)
- Slučajno
- Round Robin (RR)
-

□ U telekomunikacionim mrežama dolazni proces je tipično vezan za pojavljivanje telefonskih poziva ili poruka/paketa koji treba da budu poslani preko linka.

□ Dolazni proces i proces posluživanja karakterišu saobraćaj.

□ Neka λ predstavlja srednju dolaznu brzinu, a $E(X)$ srednje vrijeme posluživanja.

□ Intenzitet saobraćaja se definiše kao $\rho = \lambda E(X)$

Principi telekomunikacionih mreža

Litlova formula

□ Redovi čekanja se mogu opisati sa

- Srednjim brojem zahtjeva (N) uključujući one koji se poslužuju i one koje su na listi čekanja.
- Srednjim kašnjenjem (T) koje unosi red čekanja od trenutka ulaska u red čekanja do završetka posluživanja.

□ Teorema važi za najopštiji slučaj $G/G/S$ pod sledećim pretpostavkama:

- Red čekanja dostiže ravnotežno stanje
- Red čekanja se opisuje ergodičnim procesom što znači da su trenutne srednje vrijednosti jednake stacionarnim srednjim vrijednostima
- Red čekanja je *work-conserving* (serveri su uvijek dostupni za posluživanje zahtjeva i ne postoje situacije zaustavljanja posluživanja ako su serveri dostupni)

Principi telekomunikacionih mreža

Litlova formula

Neka je red čekanja u trenutku $t=0$ slobodan. Neka su sledeće oznake:

- ❑ $\alpha(t)$ broj zahtjeva koji su stigli u intervalu $(0,t)$,
- ❑ $\beta(t)$ broj zahtjeva koji su posluženi u intervalu $(0,t)$,
- ❑ t_i trenutak dolaska i -tog zahtjeva
- ❑ t_i' trenutak odlaska (završetak posluživanja) i -tog zahtjeva
- ❑ $T_i = t_i' - t_i$ vrijeme koje je i -ti zahtjev proveo u redu čekanja
- ❑ $N(t) = \alpha(t) - \beta(t)$ broj zahtjeva u redu čekanja u trenutku t , $t \geq 0$

Principi telekomunikacionih mreža

Litlova formula

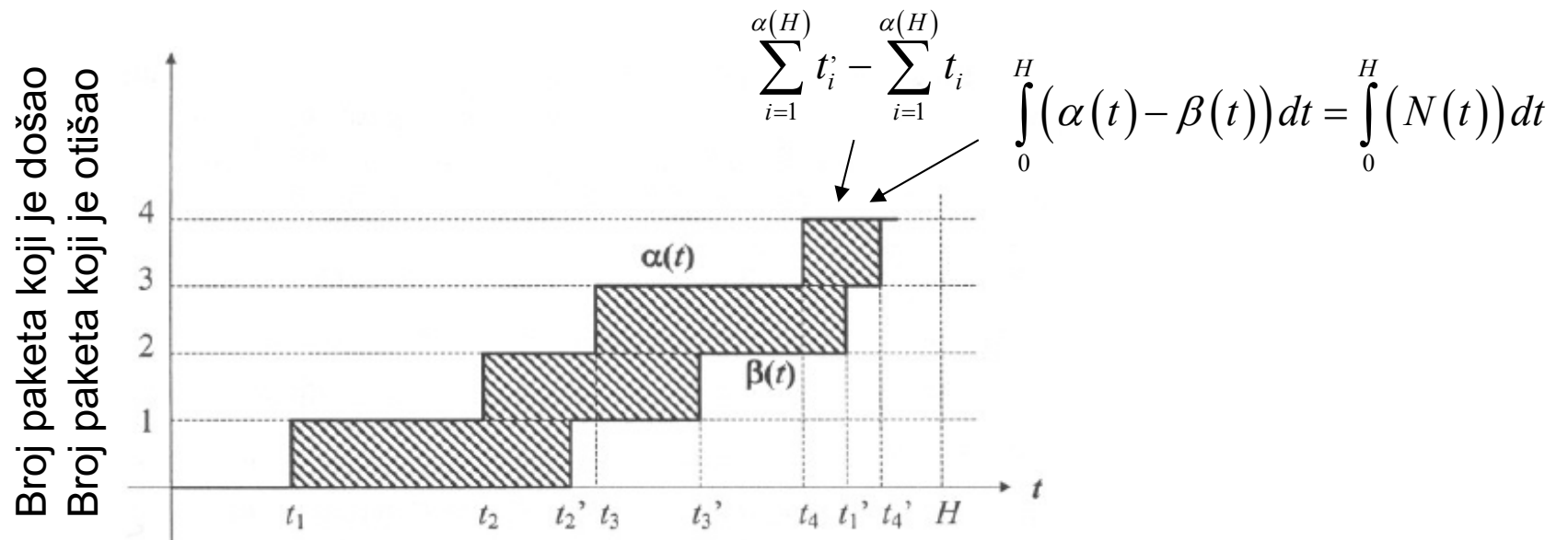
- ❑ Zanemaruje se slučaj višestrukih dolazaka ili odlazaka u istom trenutku.
- ❑ $\alpha(t)$ i $\beta(t)$ variraju za vrijednost 1 zavisno od dolazaka, odnosno odlazaka,
- ❑ $t_1 < t_2 < t_3 < t_4 \dots$
- ❑ Rangiranje t_i' zavisi od servisne politike (FIFO, LIFO,...)
- ❑ Litlova teorema se izvodi za slučaj opšte servisne politike.

Principi telekomunikacionih mreža

Litlova formula

Neka se uoči trenutak H u kome je:

□ $\alpha(t) = \beta(t)$, odnosno $N(t)=0$,



□ Srednje kašnjenje paketa koji su u red čekanja došli tokom intervala $(0, H)$ je

$$\overline{T_H} = \frac{\sum_{i=1}^{\alpha(H)} T_i}{\alpha(H)} = \frac{\sum_{i=1}^{\alpha(H)} (t'_i - t_i)}{\alpha(H)} = \frac{\sum_{i=1}^{\alpha(H)} t'_i - \sum_{i=1}^{\alpha(H)} t_i}{\alpha(H)}$$

Principi telekomunikacionih mreža

Litlova formula

- Pošto $\overline{N_H} = \frac{1}{H} \int_0^H (N(t)) dt$ predstavlja srednji broj zahtjeva u redu čekanja u intervalu $(0, H)$ i $\overline{\lambda_H} = \frac{\alpha(H)}{H}$ je srednja dolazna brzina paketa u intervalu $(0, H)$ slijedi

$$\overline{T_H} = \frac{\int_0^H (N(t)) dt}{\alpha(H)} = \frac{H}{\alpha(H)} \frac{1}{H} \int_0^H (N(t)) dt = \frac{\overline{N_H}}{\overline{\lambda_H}}$$

- Korišćenjem osobine ergodičnosti slijedi

$$T = \frac{N}{\lambda} \Leftrightarrow N = \lambda T$$

- Ova teorema se može dokazati i za slučaj $\alpha(t) > \beta(t)$

Principi telekomunikacionih mreža

Litlova formula

Prethodna relacija se može koristiti za analizu dva dijela reda čekanja liste čekanja i servisnog dijela. Neka važi sledeća notacija:

- $E[X]$ - srednje vrijeme posluživanja paketa
- $E[W]$ - srednje vrijeme provedeno u redu čekanja čekajući na posluživanje
- $\bar{N}_q$ - srednji broj paketa na listi čekanja
- $\bar{N}_s$ - srednji broj paketa čije je posluživanje u toku

Principi telekomunikacionih mreža

Litlova formula

Slijede relacije:

$$\bar{T} = E(X) + E(W)$$

$$\lambda \bar{T} = \lambda E(X) + \lambda E(W) \Rightarrow \bar{N} = \bar{N}_s + \bar{N}_q$$

$$\bar{N}_s = \rho$$

$$\varphi = \frac{\bar{N}_s}{S} \quad \text{Faktor iskorišćenja servera } \varphi \in [0,1)$$

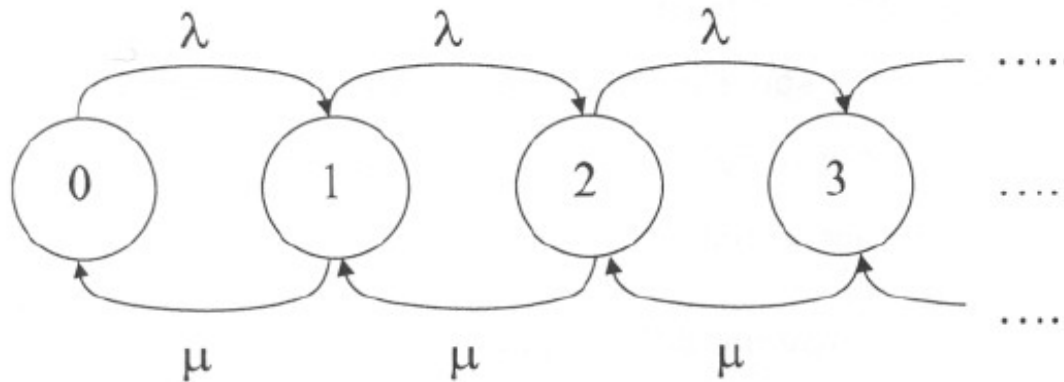
Veoma važna teorema u telekomunikacijama zato što se svako čvorište može prikazati kao skup bafera povezanih na određene linkove.

Principi telekomunikacionih mreža

M/M/1

Red čekanja sa sledećim karakteristikama

- ❑ Poasonov dolazni proces srednje dolazne brzine λ
- ❑ Eksponencijalno vrijeme posluživanja parametra μ
- ❑ Jedan server
- ❑ Beskonačna širina liste čekanja
- ❑ Beskonačan broj izvora saobraćaja



Markovljev lanac rađanja i umiranja sa $\lambda_i \equiv \lambda$ i $\mu_i \equiv \mu$. Intenzitet dolaznog saobraćaja $\rho = \lambda / \mu$

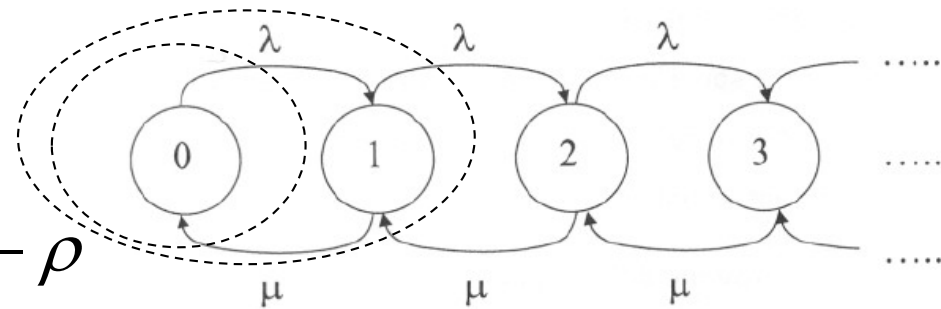
Principi telekomunikacionih mreža

M/M/1

Korišćenjem relacija datih za opšti slučaj Markovljevog lanca rađanja i umiranja dobija se

$$P_i = P_0 \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^i = P_0 \rho^i$$

$$P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{\infty} \rho^i} = \frac{1}{\sum_{i=0}^{\infty} \rho^i} = 1 - \rho$$



$$P_i = (1 - \rho) \rho^i, \quad i \geq 0$$

Koja je ovo raspodjela?

- Uslov ergodičnosti za stabilnost reda čekanja je ispunjen ako je intenzitet saobraćaja manji od 1E. To znači da je $P_0 > 0$, tj. red čekanja mora nekada biti slobodan.

Principi telekomunikacionih mreža

M/M/1

$$P(z) = \sum_{i=0}^{\infty} (1-\rho) \rho^i z^i = \frac{1-\rho}{1-z\rho}$$

$$\bar{N} = \sum_{i=0}^{\infty} i(1-\rho) \rho^i z^i = \frac{dP(z)}{dz} \Big|_{z=1} = \frac{\rho}{1-\rho}$$

$$\bar{T} = \frac{\bar{N}}{\lambda} = \frac{1}{\mu - \lambda}$$

T ne zavisi od servisne politike, osim ako redosled posluživanja ne zavisi od vremena provedenog u redu čekanja.

$\rho \rightarrow 1$ Erlang

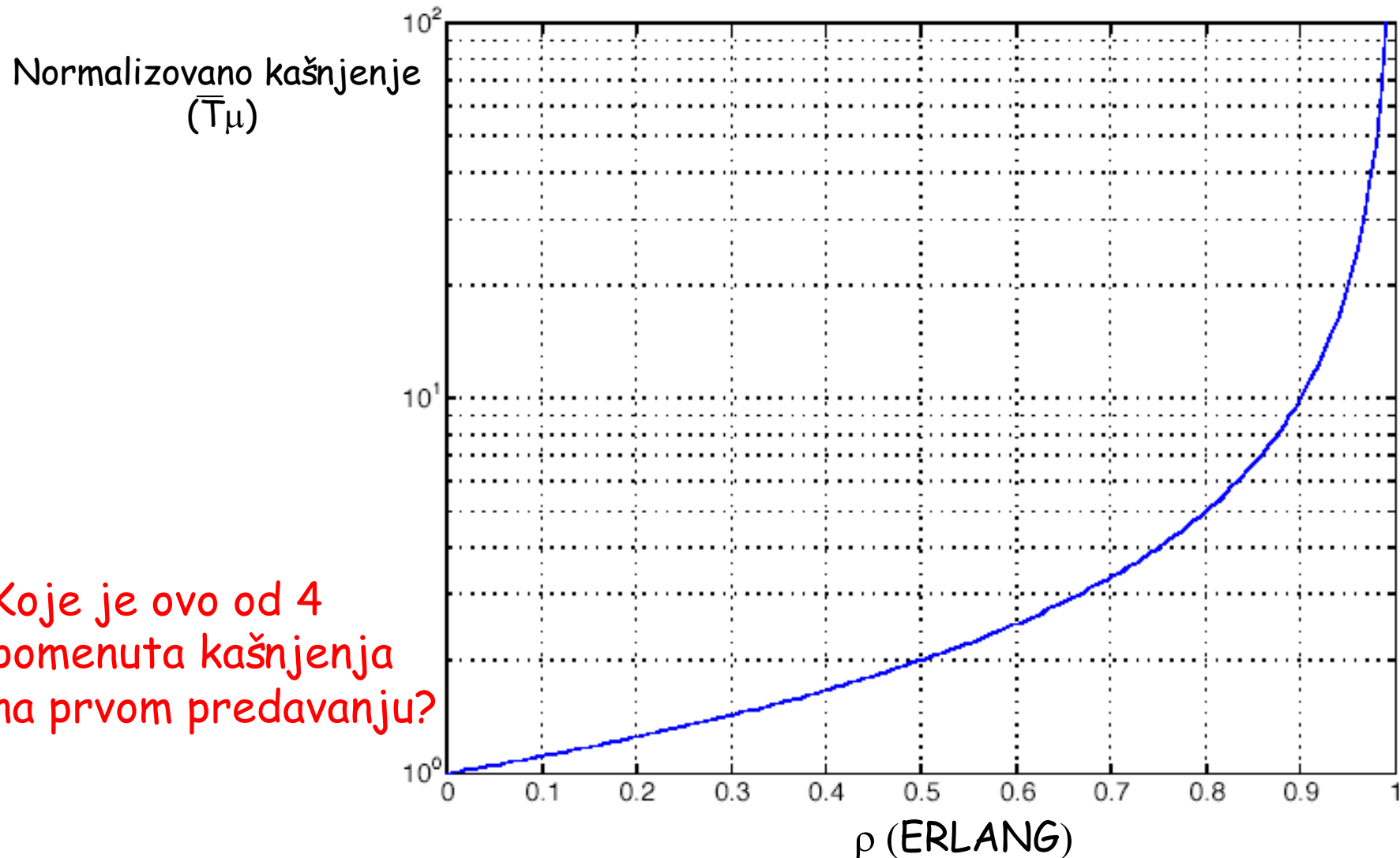
Red postaje zagušen, srednji broj paketa i srednje kašnjenje rastu.

$$\gamma = \sum_{i=1}^{\infty} \mu(1-\rho) \rho^i = \mu(1-P_0)$$

Propusnost reda čekanja ili saobraćaj koji prenosi red čekanja. U stabilnom stanju propusnost je jednaka λ .

Principi telekomunikacionih mreža

M/M/1



Principi telekomunikacionih mreža

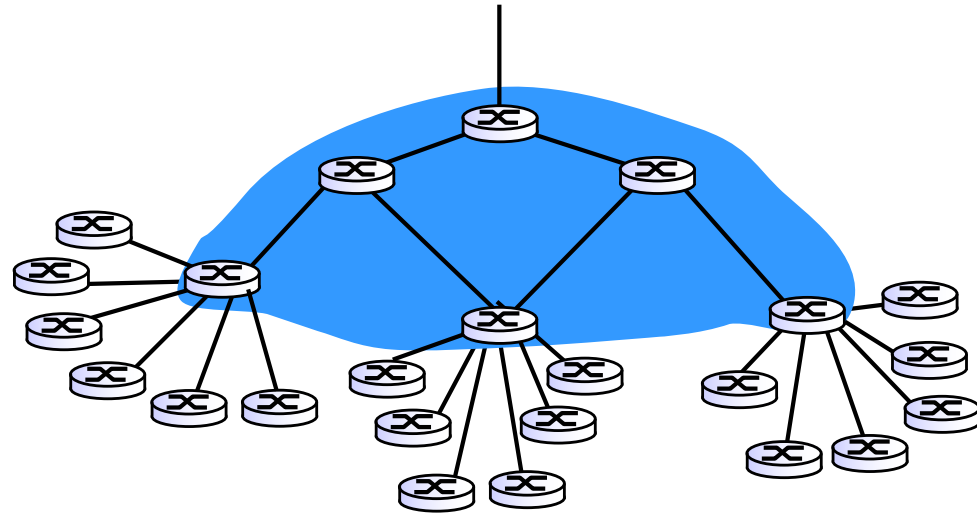
Skalabilnost

- ❑ Hijerarhijsko rutiranje
- ❑ *Best effort* servis
- ❑ E2E servis i *stateless* ruteri
- ❑ Hijerarhijska dodjela imena

Principi telekomunikacionih mreža

Skalabilnost

Hijerarhijsko adresiranje



- ❑ U mreži ima $M=N^2$ rutera što bi značilo da svaki ruter u tabeli prosleđivanja treba da ima toliko ruta
- ❑ Svakom ruteru treba u stvari N ruta do rutera iz svoje grupe i još $N-1$ ruta na okosnici što je značajno manje od N^2
- ❑ Nehijerarhijsko adresiranje (Ethernet) ima smisla samo u mrežama sa malim brojem uređaja.

Principi telekomunikacionih mreža

Skalabilnost

Autonomni sistemi

- ❑ Ruteri se grupišu u “autonomne sisteme” (AS)
- ❑ ruteri u istom AS izvršavaju isti protokol rutiranja
 - “ intra-AS ” protokol rutiranja se slično ponaša objašnjenim idealizovanim modelima
 - ruteri u različitim AS mogu izvršavati različite intra-AS protokole rutiranja

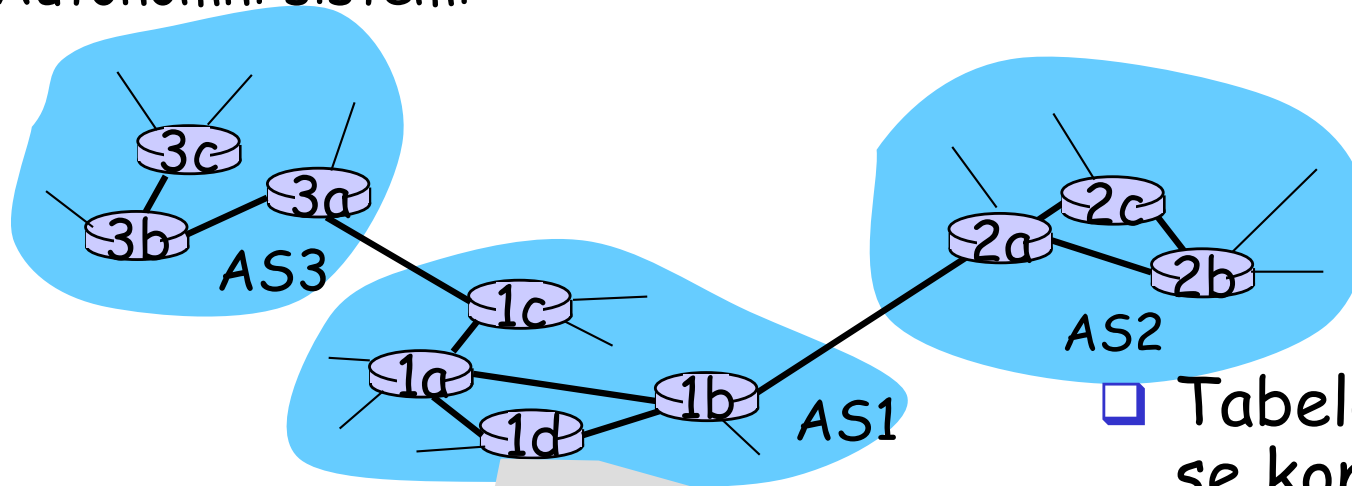
Gateway ruter

- ❑ Prosleđuje datagrame van AS

Principi telekomunikacionih mreža

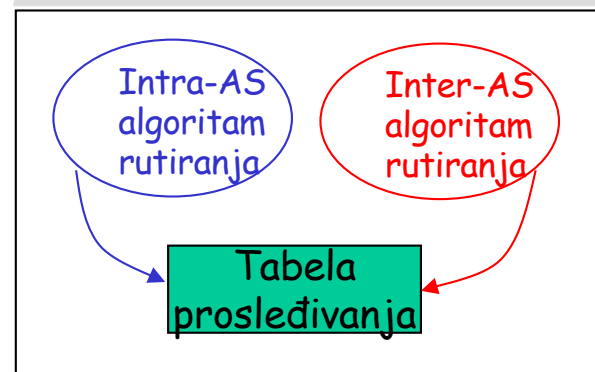
Skalabilnost

Autonomni sistemi



□ Tabela prosleđivanja se konfiguriše i sa intra- i sa inter-AS algoritmom rutiranja

- Intra-AS setuje sadržaje za interne destinacije
- Inter-AS & Intra-AS setuju sadržaje za eksterne destinacije



Principi telekomunikacionih mreža

Skalabilnost

Best effort servis

- ❑ Internet ne nudi nikakve garancije u pogledu performansi
- ❑ Ovakav servis se naziva *best effort* jer mreža pokušava pakete prenijeti što bolje ali bez ikakvih garancija
- ❑ U telefoniji se prenosu govora precizno garantuju performanse (kašnjenje u jednom smjeru manje od 250ms)
- ❑ Prenos videa dobrog kvaliteta zahtijeva brzinu prenosa veću od 50kb/s
- ❑ Internet postepeno, kako se razvija tehnologija, uvodi aplikacije koje zahtijevaju određene garancije

Principi telekomunikacionih mreža

Skalabilnost

End2End princip i *stateless* ruteri

- ❑ *Best effort* servis omogućava da ruteri ne moraju evidentirati pakete koje su prosljedili ili ne moraju uspostavljati veze za njihov prenos
- ❑ Generalni princip na Internetu je da ruteri imaju minimalan broj funkcija i da sve što ne moraju da rade obavljaju hostovi na krajevima mreže (*End2End* princip)
- ❑ Ruteri prosleđuju svaki paket sam za sebe i ne čuvaju njihove kopije nakon prosleđivanja
- ❑ Zato su ruteri napravljeni kao *stateless* uređaji jer ne vode računa da li određeni paket pripada nekoj konekciji
- ❑ To značajno doprinosi njihovoj niskoj cijeni i robusnosti

Principi telekomunikacionih mreža

Skalabilnost

Hijerarhijska dodjela imena

- ❑ DNS automatski prevodi imena u IP adrese
- ❑ Imena servera imaju hijerarhijsku strukturu
- ❑ First level domeni (edu, com, me,...)
- ❑ Second level domeni (ac,...)
- ❑ ...
- ❑ Za svaki domen je zadužen poseban administrativni entitet koji administrira odgovarajući DNS server
- ❑ DNS je globalna distribuirana baza imena

- ❑ `www.ucg.ac.me`

Principi telekomunikacionih mreža

Arhitektura aplikacija

- ❑ Klijent/server
- ❑ P2P
- ❑ *Cloud computing*
- ❑ *Content distribution*
- ❑ *Multicast/anycast*
- ❑ *Push/Pull*
- ❑ *Discovery*
- ❑ ...

Principi telekomunikacionih mreža

Arhitektura aplikacija

Klijent - server

- ❑ Web
- ❑ Korisnikov host je klijent koji se povezuje na web server
- ❑ Klijent od servera traži file-ove koje mu server šalje
- ❑ Komunikacija se obavlja isključivo između klijenta i servera, odnosno nema komunikacije između klijenata
- ❑ Kod weba transfer počinje klikom na *hyper* link koji se sastoji od imena servera i imena fajla
- ❑ Farme servera ili data centri
- ❑ Asimetričnost saobraćaja

Principi telekomunikacionih mreža

Arhitektura aplikacija

P2P

- ❑ Fajlovi nisu na serverima već na hostovima
- ❑ BitTorrent
 - Korisnik traži listu hostova koji posjeduju fajl
 - Korisnik može tražiti fajl sa tih hostova
 - Korisnik može paralelno dobijati različite djelove fajla sa tih hostova
- ❑ Kapacitet servisa raste sa popularnošću fajla jer se fajl nalazi istovremeno na sve više mjesta
- ❑ Manje asimetričnog saobraćaja

Principi telekomunikacionih mreža

Arhitektura aplikacije

Cloud computing

- ❑ Korisnik koristi *computing service* data centra koji je dostupan preko mreže
- ❑ Umjesto kupovine i instalacije servisa korisnik iznajmljuje servis
- ❑ Korisnik može uploadovati svoj *software* na *cloud*

Content distribution

- ❑ Skup data centara na različitim lokacijama mreže radi bolje distribucije sadržaja korisnicima
- ❑ Na zahjtev korisnika odgovara server čija komunikacija sa korisnikom ima najbolje performanse
- ❑ Akamai

Principi telekomunikacionih mreža

Arhitektura aplikacije

Multicast/Anycast

- ❑ Multicast predstavlja prenos fajla ili toka grupi hostova
- ❑ Hostovi su pretplaćeni na ovu vrstu servisa i od servera dobijaju informacije
- ❑ Ako je u grupi samo jedan host onda se radi o unicast prenosu
- ❑ Mreža može imati posebne uređaje koji repliciraju broj paketa kako bi se minimizovao broj duplih paketa na linkovima
- ❑ Twitter je multicast aplikacija.
- ❑ Anycast se odnosi na prenos sadržaja bilo kojem hostu iz grupe
- ❑ Primjer anycast servisa je slanje zahtjeva na koji može da odgovori bilo koji server iz grupe servera

Principi telekomunikacionih mreža

Arhitektura aplikacije

Push/Pull

- ❑ Kada korisnik pretražuje web njegov host povlači (pull) informacije sa servera
- ❑ Korisnik koji je pretplaćen na neke dnevne novine od servera dobija push service prema određenom rasporedu i kada je korisnik slobodan.

Discovery

- ❑ U mnogim aplikacijama korisnik specificira sadržaje koje traži.
- ❑ Međutim postoje aplikacije koje otkrivaju i predlažu informacije za korisnika.
- ❑ Recimo gdje je obližnji restoran ili taxi...