

### 3. Principi telekomunikacionih mreža

Prof.dr Igor Radusinović

igorrr@ucg.ac.me

dr Slavica Tomović

slavicat@ucg.ac.me

Telekomunikacione mreže

3-1

1

### Principi telekomunikacionih mreža

- Dijeljenje resursa
- Performanse mreže
- Skalabilnost
- Aplikacije

Telekomunikacione mreže

3-2

2

1

## 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).

Telekomunikacione mreže      3-3

3

## 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

Telekomunikacione mreže      3-4

4

2

## 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 koliko se može poslati 100MB?
- ❑ Linkovi ne moraju imati identične brzine u oba smjera prenosa bita. Na primjer ADSL konekcija ima dve 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 uvek manja od brzine prenosa linka.

Telekomunikacione mreže 3-5

5

## 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 uvek manja ili jednaka od kapaciteta linka koji predstavlja teorijski maksimalnu moguću brzinu prenosa na linku!

Telekomunikacione mreže 3-6

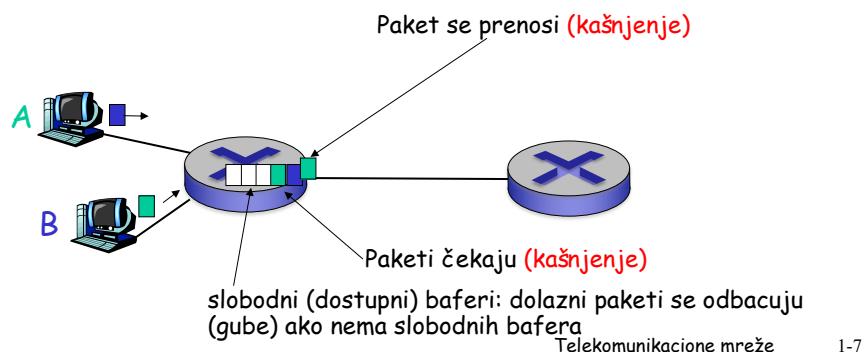
6

## Principi telekomunikacionih mreža

### Kašnjenje

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

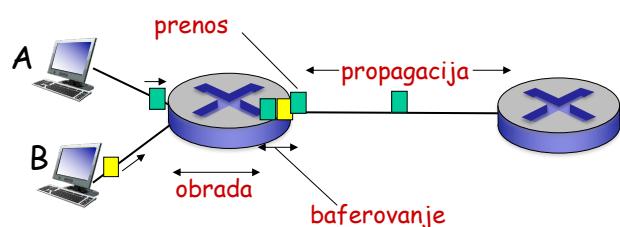
- Dolazna brzina paketa je približna ili prevaziđa kapacitet odlaznog linka
- Paketi čekaju na slanje



7

## Principi telekomunikacionih mreža

### Kašnjenje



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

$d_{\text{obrade}}$ : obrada paketa

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

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

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

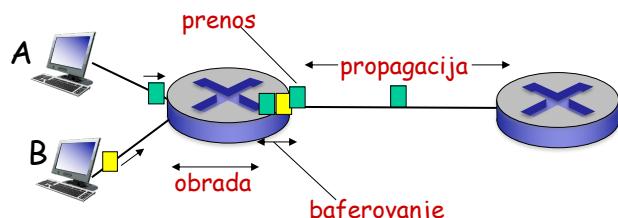
Telekomunikacione mreže

3-8

8

## Principi telekomunikacionih mreža

### Kašnjenje



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

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

- $L$ : veličina paketa (b)
- $R$ : kapacitet linka ( $b/s$ )
- $d_{\text{prenosa}} = L/R$

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

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

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

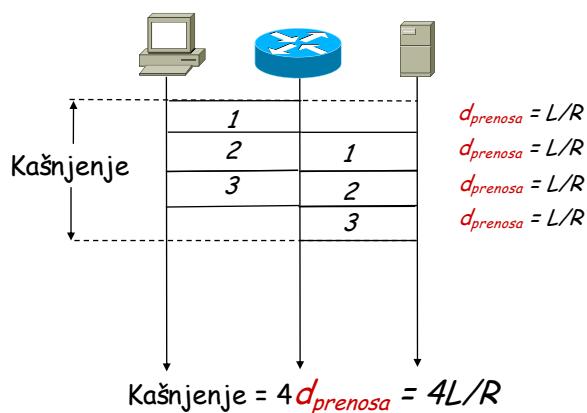
Telekomunikacione mreže 3-9

9

## Principi telekomunikacionih mreža

### Kašnjenje

1. Postoji samo kašnjenje uslijed prenosa



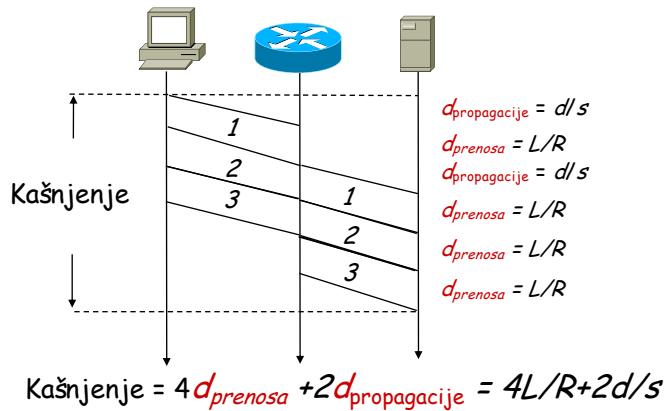
Telekomunikacione mreže 3-10

10

## Principi telekomunikacionih mreža

### Kašnjenje

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



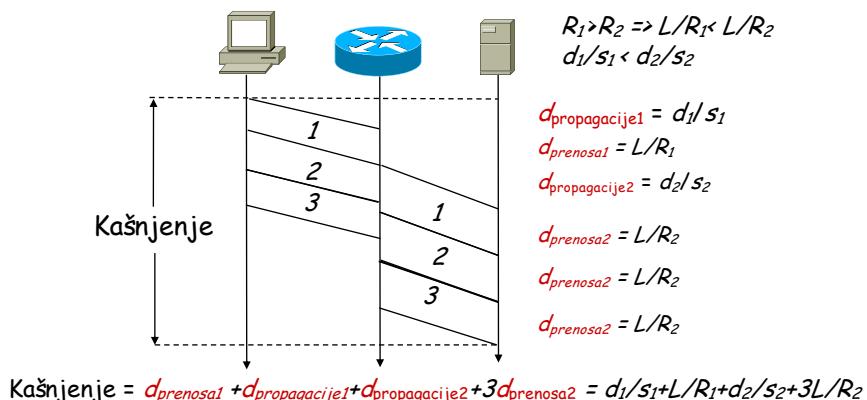
Telekomunikacione mreže 3-11

11

## Principi telekomunikacionih mreža

### Kašnjenje

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



Telekomunikacione mreže 3-12

12

## Principi telekomunikacionih mreža

### Kašnjenje

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



www.traceroute.org

Telekomunikacione mreže

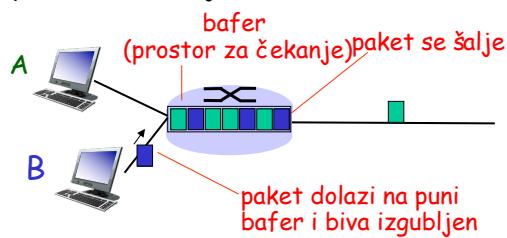
3-13

13

## 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 izvořišnog krajnjeg sistema ili se ponovo ne šalje



Telekomunikacione mreže

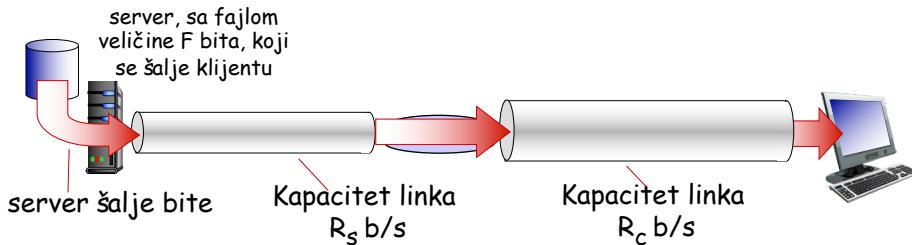
3-14

14

## 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



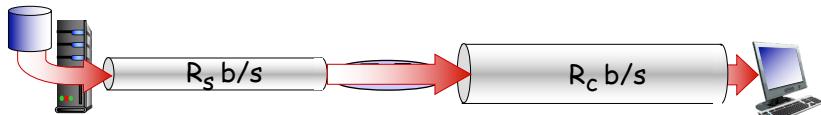
Telekomunikacione mreže 3-15

15

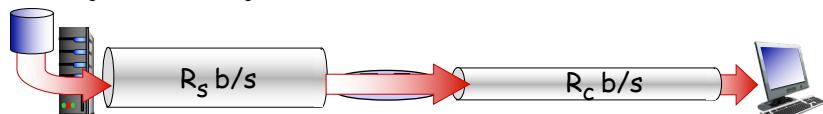
## Principi telekomunikacionih mreža

### 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

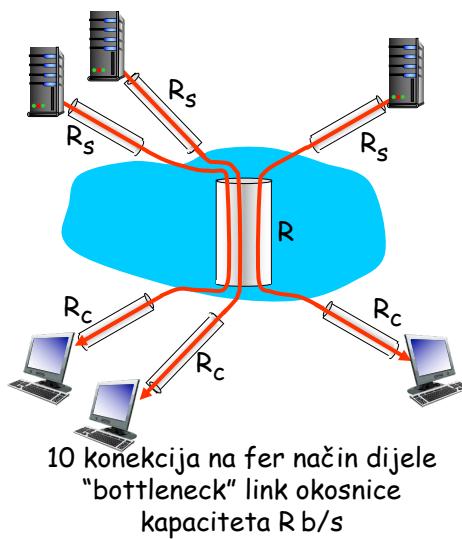
Telekomunikacione mreže 3-16

16

## Principi telekomunikacionih mreža

### Propusnost

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



Na propusnost utiču i protokoli!

Telekomunikacione mreže 3-17

17

## 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.

Telekomunikacione mreže 3-18

18

## 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 uključuju formiranje redova čekanja paketa ili poziva.

Telekomunikacione mreže 3-19

19

## 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 sistema koji povezuju mrežna čvorista)
- Utvrđivanje performansi protokola pristupa za različite korisnike koji se takmiče za isti resurs

Telekomunikacione mreže 3-20

20

10

## 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 u trenutku  $t$ .
- Opisuje se sa
  - dolaznim procesom zahtjeva,
  - načinom izbora zahtjeva za posluživanje i
  - procesom posluživanja.

Telekomunikacione mreže 3-21

21

## Principi telekomunikacionih mreža

### Stohastički proces

- se identificira 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.

Telekomunikacione mreže 3-22

22

## 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  $\tau$  važi

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

Funkcija raspodjele vjerovatnoća  
je invarijantna na privremene  
translacije

Telekomunikacione mreže 3-23

23

## Principi telekomunikacionih mreža

### Stohastički proces

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

Telekomunikacione mreže 3-24

24

## Principi telekomunikacionih mreža

### Stohastički proces

- Specijalan slučaj stohastičkog procesa je Markovljev lanac kod kojeg slučajna promjenljiva uzima samo diskrete vrijednosti, pri čemu stanje  $X[t_{n+1}]$  zavisi samo od stanja  $X[t_n]$  u neposrednom prethodnom trenutku.
- 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:

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

Telekomunikacione mreže 3-25

25

## Principi telekomunikacionih mreža

### Stohastički proces

- U slučaju da su trenuci tranzicije diskretni, radi se diskretnom lancu.
- Važni Markovljevi lanci su:
  - Proces rađanja i umiranja (*birth and death*), 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 Poissonov 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.

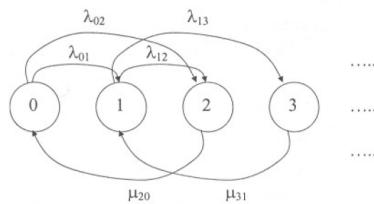
Telekomunikacione mreže 3-26

26

## 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.



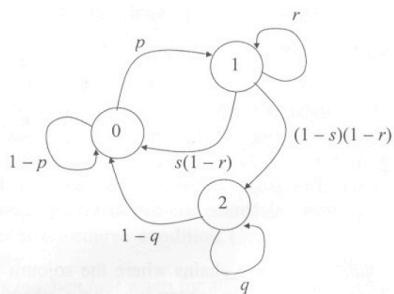
Telekomunikacione mreže 3-27

27

## 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.



Telekomunikacione mreže 3-28

28

## Principi telekomunikacionih mreža

### Poasonov dolazni proces

- Koristi se za opisivanje broja dolazaka  $N_t$  u intervalu t.
- Ako sa  $\lambda$  označimo srednju dolaznu brzinu, imamo 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

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

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

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

Telekomunikacione mreže 3-29

29

## 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.

Telekomunikacione mreže 3-30

30

## Principi telekomunikacionih mreža

### Poasonov dolazni proces

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

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

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

Telekomunikacione mreže 3-31

31

## Principi telekomunikacionih mreža

### Primjena Poasonovog dolaznog procesa

#### Modelovanje dolaska:

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

Telekomunikacione mreže 3-32

32

## Principi telekomunikacionih mreža

### Poasonov dolazni proces

#### Osobine

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

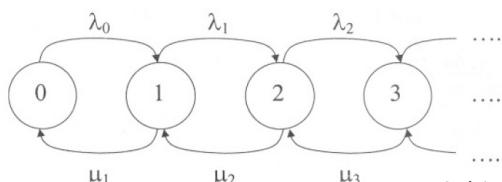
Telekomunikacione mreže 3-33

33

## 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  $k-1$ .
- $\lambda_i$  je srednja brzinu rađanja iz stanja  $i$  u stanje  $i+1$
- $\mu_m$  je srednju brzinu umiranja iz stanja  $m$  u stanje  $m-1$ .
- $P_n$  je vjerovatnoću da se lanac nalazi u stanju  $n$ .



Telekomunikacione mreže 3-34

34

## Principi telekomunikacionih mreža

### Markovljev lanac rađanja i umiranja

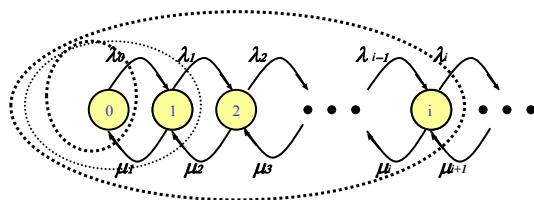
- Vremensko ponašanje ovog lanca je opisano Kolmogorov-Chapmanovim jednačinama.
- Mi se bavimo samo karakteristikama lanca u ravnoteži, ako ona postoji.
- Dovoljan uslov da postoji ravnoteža je uslov ergodičnosti
  - $\exists$  indeks  $k_0$  tako da za  $\forall k \geq k_0$  imamo  $\lambda_k / \mu_k < 1$
- 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.

Telekomunikacione mreže 3-35

35

## Principi telekomunikacionih mreža

### Markovljev lanac rađanja i umiranja



Dijagram stanja za proces radanja i umiranja

- Napraviti balansne jednačine za svaki presjek.

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

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

...

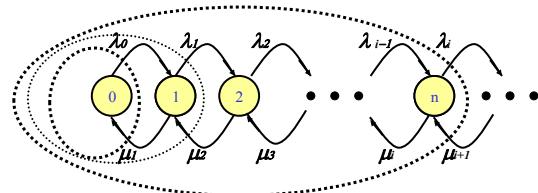
$$\lambda_{i-1} P_{i-1} = \mu_i P_i \Rightarrow P_i = \frac{\lambda_{i-1}}{\mu_i} P_{i-1} = P_0 \prod_{n=1}^i \frac{\lambda_{n-1}}{\mu_n}, \forall i \geq 1$$

Telekomunikacione mreže 3-36

36

## Principi telekomunikacionih mreža

### Markovljev lanac rađanja i umiranja



Dijagram stanja za proces rađanja i umiranja

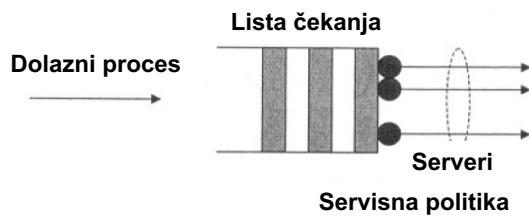
$$\sum_{i=0}^{\infty} P_i = 1 \Rightarrow P_0 \sum_{i=0}^{\infty} \frac{P_i}{P_0} = 1 \Rightarrow P_0 \left( 1 + \sum_{i=1}^{\infty} \prod_{n=1}^i \frac{\lambda_{n-1}}{\mu_n} \right) = 1 \Rightarrow P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{\infty} \prod_{n=1}^i \frac{\lambda_{n-1}}{\mu_n}}$$

Telekomunikacione mreže 3-37

37

## 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 mesta u redu čekanja
- E - broj izvora koji generišu saobraćaj

Telekomunikacione mreže 3-38

38

19

## Principi telekomunikacionih mreža

### Notacija za redove čekanja

- Servisna politika
  - First Input First Out (FIFO)
  - Last Input First Out (LIFO)
  - Slučajno
  - Round Robin (RR)
  - ....
- U polju telekomunikacija dolazni proces je tipično vezan za pojavljivanje telefonskoh poziva ili poruka/paketa koji treba da budu poslati preko linka.
- Dolazni proces i proces posluživanja karakterišu saobraćaj.
- Neka  $\lambda$  predstavlja srednju dolaznu brzinu, a  $E(X)$  srednje vrijeme posluživanja.
- Intenzitet saobraćaja se definiše kao  $\rho = \lambda E(X)$

Telekomunikacione mreže 3-39

39

## 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 postoji situacije zaustavljanja posluživanja ako su serveri dostupni)

Telekomunikacione mreže 3-40

40

20

## Principi telekomunikacionih mreža

### Litlova formula

Neka je red čekanja u trenutku  $t=0$  slobodan. Uvedimo 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  $t$ ,  $t \geq 0$

Telekomunikacione mreže 3-41

41

## Principi telekomunikacionih mreža

### Litlova formula

Zanemariti 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.

Telekomunikacione mreže 3-42

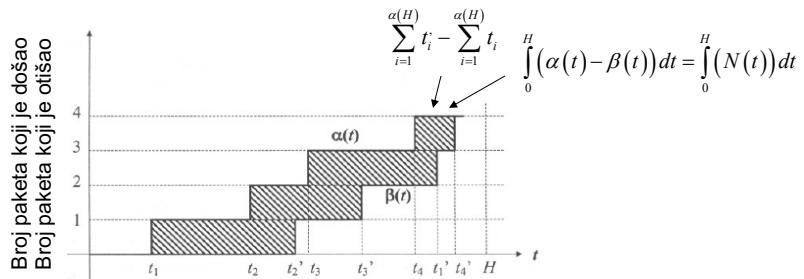
42

## Principi telekomunikacionih mreža

### Litlova formula

Uočiti trenutak  $H$  u kome je:

- $\alpha(t) = \beta(t)$  tj  $N(t)=0$ ,



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

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

Telekomunikacione mreže 3-43

43

## 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  $a(t) > b(t)$

Telekomunikacione mreže 3-44

44

## Principi telekomunikacionih mreža

### Litlova formula

Prethodna relacija se može koristiti za analizu dva dijela reda čekanja liste čekanja i servisnog dijela. Uvedimo sledeću notaciju:

- $E[X]$  - 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

Telekomunikacione mreže 3-45

45

## Principi telekomunikacionih mreža

### Litlova formula

#### Slijede relacije:

$$\begin{aligned}\bar{T} &= E(X) + E(W) \\ \lambda\bar{T} &= \lambda E(X) + \lambda E(W) \Rightarrow \bar{N} = \bar{N}_s + \bar{N}_q \\ \bar{N}_s &= \rho \\ \varphi &= \frac{\bar{N}_s}{S} \quad \text{Faktor iskorišćenja servera } \varphi \in [0,1]\end{aligned}$$

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

Telekomunikacione mreže 3-46

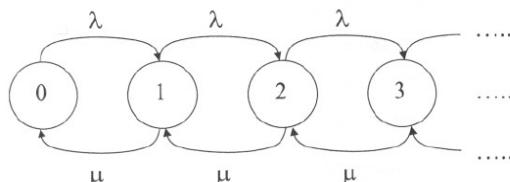
46

## Principi telekomunikacionih mreža

M/M/1

Red čekanja sa sledećim karakteristikama

- ❑ Poasonov dolazni proces srednje dolazne brzine  $\lambda$
- ❑ Eksponencijalno vrijeme posluživanja parametra  $\mu$
- ❑ Jedan server
- ❑ Beskonačna širina liste čekanja
- ❑ Beskonačan broj izvora saobraćaja



Markovljev lanac rađanja i umiranja sa  $\lambda=l$  i  $\mu=m$ . Intenzitet dolaznog saobraćaj  
 $p=\lambda/\mu$

Telekomunikacione mreže 3-47

47

## Principi telekomunikacionih mreža

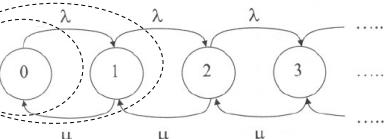
M/M/1

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.

Telekomunikacione mreže 3-48

48

## 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.

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

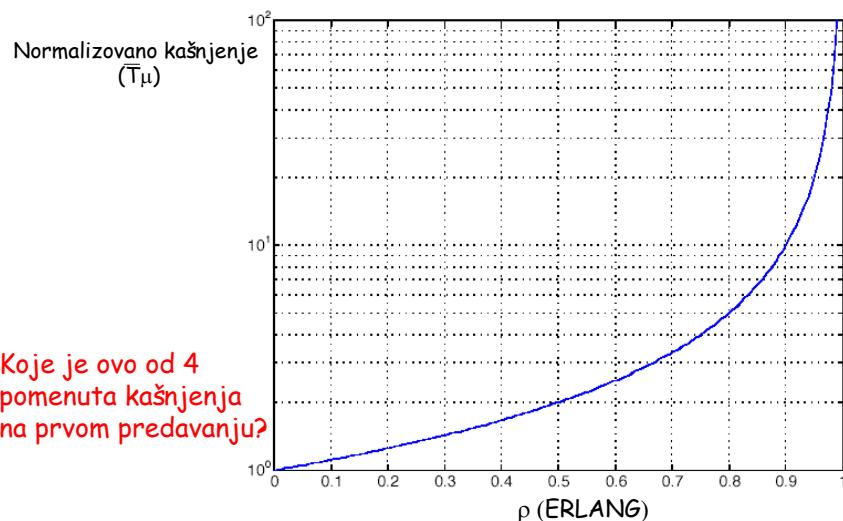
Propusnost reda čekanja ili  
saobraćaj koji prenosi red čekanja.  
U stabilnom stanju propusnost  
je jednaka l.

Telekomunikacione mreže      3-49

49

## Principi telekomunikacionih mreža

### M/M/1



Telekomunikacione mreže      3-50

50

## Principi telekomunikacionih mreža

### Skalabilnost

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

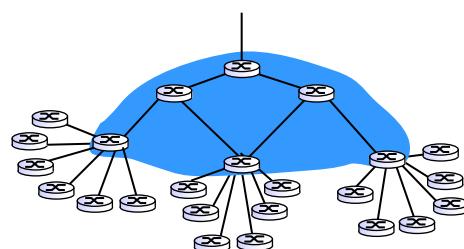
Telekomunikacione mreže 3-51

51

## Principi telekomunikacionih mreža

### Skalabilnost

#### Hijerarhijsko adresiranje



- U mreži ima  $M=N^2$  ruteri što bi značilo da svaki ruter u tabeli prosleđivanja treba da ima toliko ruta
- Svakom ruteru treba u stvari  $N$  ruta do ruteru 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.

Telekomunikacione mreže 3-52

52

## 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 objašnjениm idealizovanim modelima
  - ruteri u različitim AS mogu izvršavati različite intra-AS protokole rutiranja

#### Gateway ruter

- Prosleđuje datagrame van AS

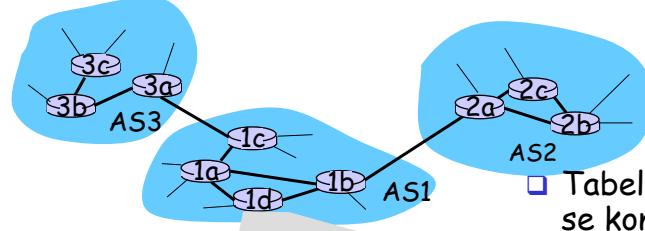
Telekomunikacione mreže 3-53

53

## 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

Telekomunikacione mreže 3-54

54

## 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

Telekomunikacione mreže 3-55

55

## Principi telekomunikacionih mreža

### Skalabilnost

#### *End2End* princip i *stateless* ruteri

- Best effort* servis omogućava da ruteri ne moraju evidentirati pakete koje su proslijedili 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 rade 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 njihovoј niskoj cijeni i robusnosti

Telekomunikacione mreže 3-56

56

## 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

Telekomunikacione mreže 3-57

57

## Principi telekomunikacionih mreža

### Arhitektura aplikacija

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

Telekomunikacione mreže 3-58

58

29

## 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
- Farne servera ili data centri
- Asimetričnost saobraćaja

Telekomunikacione mreže 3-59

59

## Principi telekomunikacionih mreža

### Arhitektura aplikacija

#### P2P

- Fajlovi nisu na serverima već na hostovima
- BitTorrent
  - Korisnik traži listu hostova koji posjeduju fajla
  - 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 mesta
- Manje asimetričnog saobraćaja

Telekomunikacione mreže 3-60

60

30

## Principi telekomunikacionih mreža

### Arhitektura aplikacije

#### Cloud computing

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

#### Content distribution

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

Telekomunikacione mreže 3-61

61

## 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

Telekomunikacione mreže 3-62

62

31

## 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...