

Računarske mreže

(Studijski program: Telekomunikacije)

Prof.dr Igor Radusinović

igorr@ac.me

mr Slavica Tomović

slavicat@ac.me

O čemu se radi?

Kurs u računarskim mrežama nudi:

- Savladavanje **principa** na kojima počivaju računarske mreže
- upoznavanje Internet arhitekture/protokola na osnovnom nivou
- Ovladavanje osnovnim analitičkim mehanizmima za opisivanje pojava na Internetu

Ciljevi

- Dostići početno znanje iz računarskih mreža
- Stvaranje uslova za aktivno učešće polaznika u budućem razvoju Interneta

Zašto je ova oblast interesantna?

Računarske mreže su:

- Relevantne jer imaju uticaj na čitav svijet
- Interdisciplinarna oblast u kojoj se sve oblasti elektrotehnike prepliću sa ekonomijom, pravom,...
- Veoma popularne u nauci i inovacijama
- Relativno mlada oblast sa velikim potencijalom za dalji razvoj
- Veliki broj razvojnih platformi
 - Testbed-ovi: **Emulab**, PlanetLab, Orbit, GENI
 - Programabilni: Click, **NetFPGA**, Mininet
 - Softverski ruteri: **Quagga**, **XORP** i Bird
 - Mjerenja: RouteViews, **traceroute**, Internet2

Uvod u računarske mreže 1-3

Informacije o kursu

- **Kome je namijenjen kurs?**
 - Studentima specijalističkih studija smjera Telekomunikacije
- **Šta je poželjno znati od ranije?**
 - Telekomunikacione mreže
- **Materijali kursa:**
 - Prezentacije urađene od strane autora knjige: *Computer Networking: A Top Down Approach Featuring the Internet*, J. Kurose & Keith Ross, Addison Wesley, 7th edition, 2017
 - Umrežavanje računara: *Od vrha do dna sa Internetom u fokusu*, J. Kurose & Keith Ross, Addison Wesley, prevod trećeg izdanja, CET Computer Equipment and trade, 2005
 - WWW
 - Zabilješke sa predavanja

Uvod u računarske mreže 1-4

Informacije o kursu (više)

□ Način polaganja:

| <u>Rad</u> | <u>broj</u> | <u>% ocjene</u> |
|----------------|-------------|-----------------|
| Pitalice | 5 | 10% |
| Kolokvijum | 1 | 30% |
| Seminarski rad | 1 | 20% |
| Završni ispit | 1 | 40% |
| Bonus | | do 10% |

Uvod u računarske mreže 1-5

Pregled kursa:

| | |
|--------------------|--|
| Pripremna nedjelja | Priprema i upis semestra |
| I nedjelja | Uvod u računarske mreže. |
| II nedjelja | Principi protokola nivoa aplikacije. HTTP. |
| III nedjelja | FTP. SMTP. DNS |
| IV nedjelja | Principi protokola nivoa transporta. Nekonektivni transportni servis (UDP) |
| V nedjelja | Konektivni transportni servis (TCP). |
| VI nedjelja | TCP kontrola zagušenja. TCP kontrola protoka. |
| VII nedjelja | Principi nivoa mreže |
| VIII nedjelja | KOLOKVIJUM |
| IX nedjelja | IPv4 |
| X nedjelja | IPv4 (nastavak) |
| XI nedjelja | IPv6 |
| XII nedjelja | Protokoli rutiranja |
| XIII nedjelja | Principi protokola nivoa linka. ARP |
| XIV nedjelja | Ethernet. |
| XV nedjelja | VLAN. WLAN |
| XVI nedjelja | Završni ispit |
| Završna nedjelja | Ovjera semestra i upis ocjena. |
| XVIII-XXI nedjelja | Dopunska nastava i popravni ispitni rok. |

Uvod u računarske mreže 1-6

Pregled kursa:

Glava 1: Uvod

- Šta je Internet, šta su protokoli?
- Ivice mreže, mrežno jezgro, mrežni pristup
- Kašnjenje i gubici u mrežama sa komutacijom paketa
- Internet okosnica, NAP-i and ISP-i

Pregled kursa:

Glava 2: Nivo aplikacije

- Principi protokola nivoa aplikacije
- Web i HTTP
- FTP
- Elektronska pošta na Internetu (SMTP)
- DNS

Pregled kursa :

Glava 3: Nivo transporta

- ❑ Principi protokola nivoa transporta
- ❑ Nekonektivni transportni servis: UDP
- ❑ Konektivni transportni servis: TCP
- ❑ TCP kontrola zagušenja
- ❑ TCP kontrola protoka

Uvod u računarske mreže 1-9

Pregled kursa :

Glava 4: Mrežni nivo

- ❑ Principi nivoa mreže
- ❑ IPv4 (Internet Protocol)
- ❑ IPv6
- ❑ Rutiranje na Internet-u
- ❑ Protokoli rutiranja

Uvod u računarske mreže 1-10

Pregled kursa :

Glava 5: Nivo linka, LAN-ovi

- Principi nivoa linka
- Ethernet
- VLAN
- WLAN

Laboratorijske vježbe

Računarske mreže - smjer telekomunikacije

- I. Upoznavanje sa Wireshark-om, Opnetom, Java apleti (Transmission versus Propagation Delay Applet, Queuing and Loss Applet)...
- II. Java apleti (Message Segmentation, HTTP Delay Estimation, Recursive/Iterative Queries in DNS, Go-Back-N Protocol, Selective Repeat Protocol, Flow Control)...
- III. Java apleti (IP Fragmentation, CSMA/CD, 802.11 CSMA/CA WITHOUT Hidden Terminals, 802.11 CSMA/CA WITH Hidden Terminals)...
- IV. Opnet - primjer LAN-a za višespratnu zgradu, Ispitivanje performansi aplikacija korišćenjem WAN mreže...
- V. Wireshark, demonstracija nekih interesantnih primjera

Uvod u računarske mreže

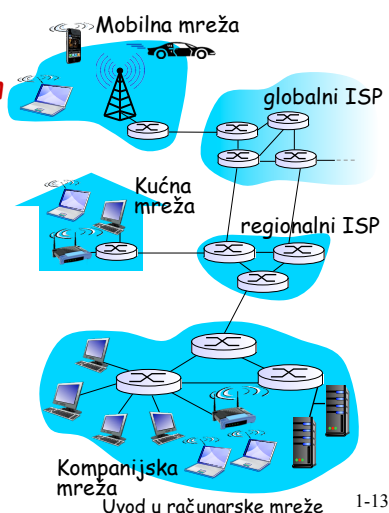
Šta je Internet?



- Milioni povezanih računara:
 - *host = krajnji sistem*
 - Izvršavaju *mrežne aplikacije*



- ❖ *Komunikacioni linkovi*
 - Optičko vlakno, bakarna žica, radio, satelit
 - Brzina prenosa: *bandwidth*
- ❖ *Komutatori paketa*: prosleđuju pakete (djelove poruka)
 - *ruteri i komutatori*

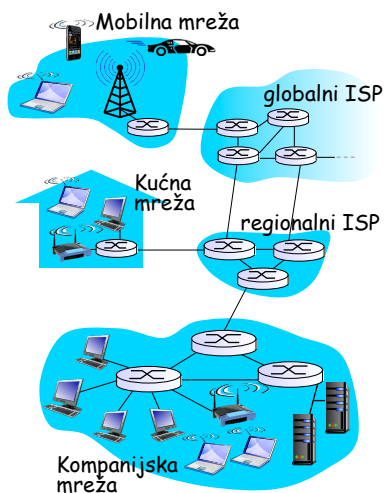


Uvod u računarske mreže 1-13

Uvod u računarske mreže

Iz čega se sastoji Internet u logičkom smislu?

- *Protokoli* kontrolišu slanje i prijem poruka
 - npr, TCP, IP, HTTP, FTP, PPP
- *Internet: "mreža svih mreža"*
 - Labava hijerarhija
 - Javni Internet
 - privatni intranet
- Internet standardi
 - RFC: Request for comments
 - IETF: Internet Engineering Task Force

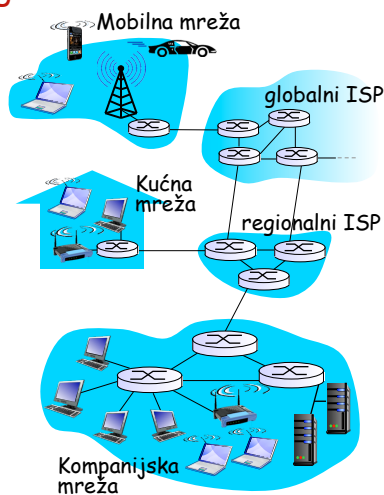


Uvod u računarske mreže 1-14

Uvod u računarske mreže

Šta je Internet sa stanovišta usluge?

- **Komunikaciona infrastruktura** koja omogućava komunikaciju između distribuiranih aplikacija:
 - Web, email, igrice, e-commerce, baze podataka, društvene mreže, file sharing
- **Omogućava programabilni interfejs do aplikacija**
 - "veza" koja omogućava aplikacijama da šalju i primaju podatke sa Interneta
 - Omogućava opcije servisa, analogne poštanskom servisu

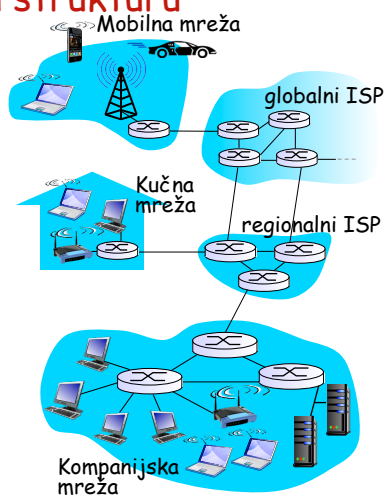


Uvod u računarske mreže 1-15

Uvod u računarske mreže

Detaljniji pogled na mrežnu strukturu

- **Mrežna ivica:** aplikacije i hostovi (klijenti i serveri)
- **Mrežna okosnica:**
 - međupovezani ruteri
 - mreža međupovezanih mreža
- **Pristupna mreža, fizički medijum:** komunikacioni linkovi (žični i bežični)

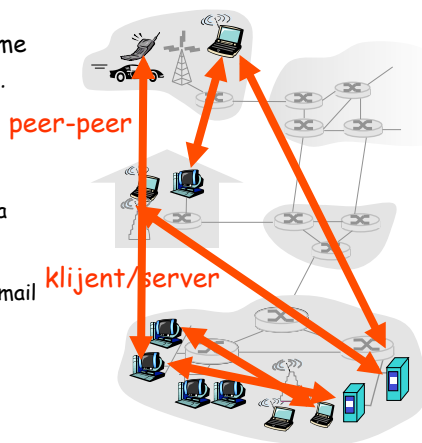


Uvod u računarske mreže 1-16

Uvod u računarske mreže

Ivica mreže

- **Krajni sistemi (hostovi):**
 - izvršavaju aplikativne programe
 - npr. Opera, Safari, Outlook,...
 - na "ivici mreže"
- **Aplikacije**
 - **klijent/server model**
 - klijent host zahtijeva, dobija servis od "uvijek dostupnog" servera
 - npr. Web browser/server; email klijent/server
 - **peer-peer (P2P) model:**
 - minimalno (ili ne) korišćenje dodijeljenih servera
 - **hibrid**
 - Neke funkcije KS, a neke P2P
 - Skype, BitTorrent



Uvod u računarske mreže 1-17

Uvod u računarske mreže

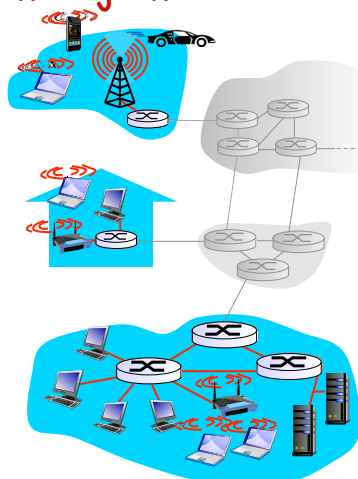
Pristupne mreže i fizički medijum

Pitanje: Kako povezati krajnji sistem na edge ruter?

- Rezidencijalne pristupne mreže
- Institucionalne pristupne mreže (kompanije, ustanove,...)
- Mobilne pristupne mreže

Važno je obratiti pažnju na

- kapacitet (b/s) pristupne mreže?
- zajednički ili dodijeljeni?

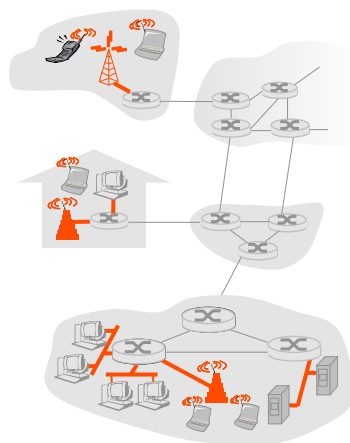


Uvod u računarske mreže 1-18

Uvod u računarske mreže

Popularni pristupi

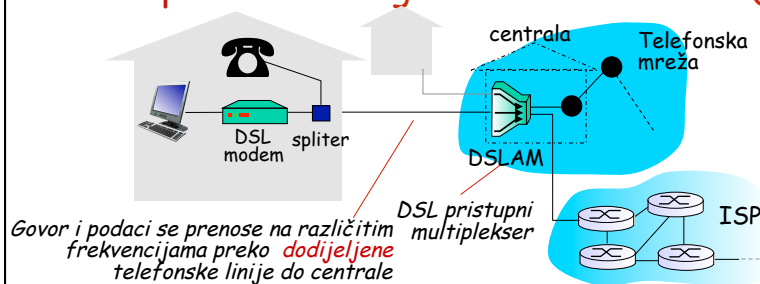
- DSL
- Kablovska
- Optičko vlakno
- Bežični pristup (UMTS, LTE, LTE-A, WiFi, WiMAX,...)



Uvod u računarske mreže 1-19

Uvod u računarske mreže

Pristupna mreža: digital subscriber line (DSL)



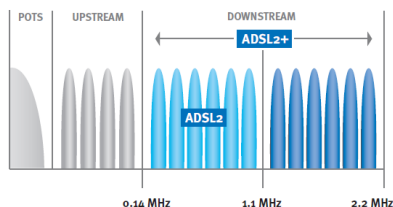
- ❖ koristi *postojeću* telefonsku liniju do DSLAM-a u telefonskoj centrali
 - Podaci se preko DSL linije prenose do Interneta
 - Govor se preko DSL linije prenosi do telefonske mreže

Uvod u računarske mreže 1-20

Uvod u računarske mreže

□ **ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)**

- ADSL2+ (ITU G.992.5 Annex M iz 2008. godine)
- do 3.3Mb/s upstream
- do 24Mb/s downstream
- Granica između opsega upstreama i downstreama na 276kHz
- FDM (DMT - Discrete MultiTone):
 - 276kHz - 2208kHz downstream (512 kanala širine 4.3125kHz)
 - 25kHz - 276kHz upstream (64 kanala širine 4.3125kHz)
 - 0 kHz - 4 kHz za telefon

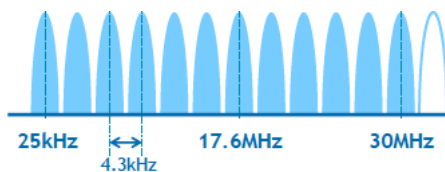


Uvod u računarske mreže 1-21

Uvod u računarske mreže

□ **VDSL (Very high bit rate Digital Subscriber Line)**

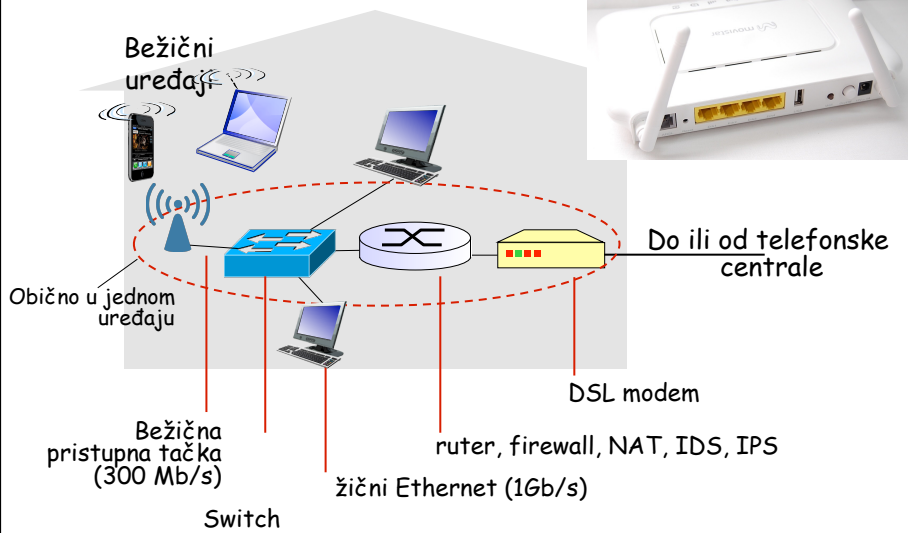
- VDSL2 Annex Q ili Vplus/35b (ITU G.993.2 amandman iz 2015. godine)
- do 100Mb/s upstream
- do 300Mb/s downstream
- 250m
- VDSL2 Vectoring (ITU-T G.993.5)
- FDM (DMT - Discrete MultiTone):
 - 25kHz - 35328kHz downstream (8192 kanala širine 4.3125kHz)



Uvod u računarske mreže 1-22

Uvod u računarske mreže

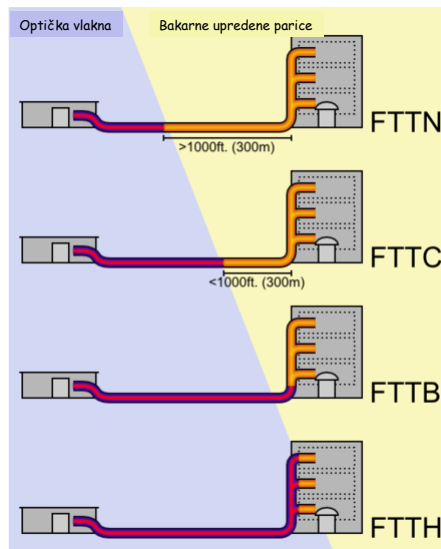
Pristupna mreža: kućna mreža



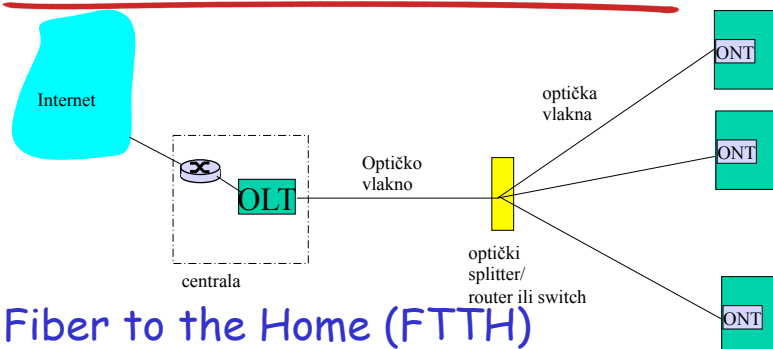
Uvod u računarske mreže

Optička pristupna mreža

- FTTH - Fiber-to-the-home
- FTTB - Fiber-to-the-building ili Fiber-to-the-basement
- FTTC - Fiber-to-the-cabinet ili fiber-to-the-curb
- FTTN - Fiber-to-the-node



Uvod u računarske mreže

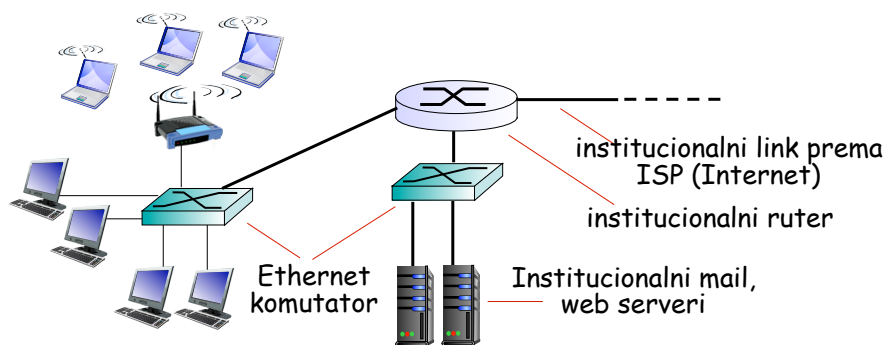


Fiber to the Home (FTTH)

- ❑ Optički linkovi od centrale do rezidencijalnog objekta
- ❑ Dvije konkurentne tehnologije:
 - Passive Optical network (PON) (20km, 32 korisnika)
 - Active Optical Network (AON) (70+20km, 500 korisnika)
- ❑ Mnogo veće brzine pristupa Internetu; triple play servisi

Uvod u računarske mreže 1-25

Uvod u računarske mreže



Kompanijska pristupna mreža (Ethernet)

- ❑ Kompanije, univerziteti,...
- ❖ 10 Mb/s, 100Mb/s, 1Gb/s, 10Gb/s
- ❖ Danas se krajnji sistemi tipično povezuju na Ethernet komutator ili WLAN access point

Uvod u računarske mreže 1-26

Uvod u računarske mreže

□ Bežične pristupne mreže

- Preko bazne stanice (pristupne tačke) ili adhoc

wireless LAN:

- Unutar objekata (30m)
- Napolju (stotinak metara)
- 802.11b/g/n (WiFi): 11/54/600



prema Internetu

www.ieee802.org/11/

WAN bežični pristup

- Celularni pristup koji nudi operator, desetine kilometara
- od nekoliko stotina kb/s do nekoliko storina Mb/s
- 3G: UMTS,
- 4G: LTE Advanced
- 4.5G: LTE Advanced Pro



prema Internetu

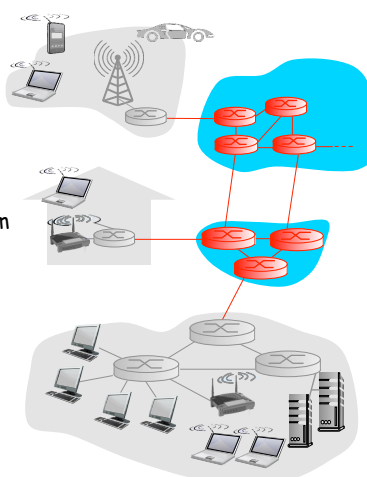
<http://www.3gpp.org>

Uvod u računarske mreže 1-27

Uvod u računarske mreže

Okosnica mreže

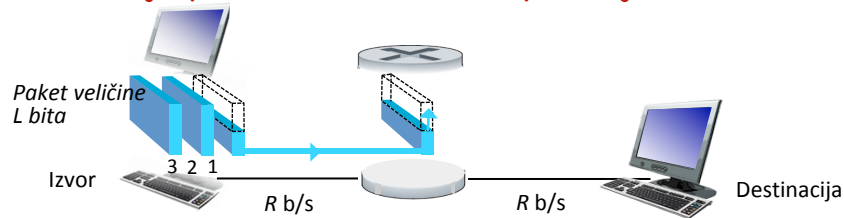
- Skup međupovezanih rutera
- Komutacija paketa (packet switching):
 - Poruke se šalju preko mreže u djelovima (paketima) iz kojih se na destinaciji rekonstruiše poruka
 - Poruke se prosleđuju od rutera do rutera
 - Svaki paket se prenosi maksimalnom brzinom prenosa koju obezbeđuje link



Uvod u računarske mreže 1-28

Uvod u računarske mreže

Komutacija paketa: uskladišti i proslijedi



- Potrebno je L/R sekundi da bi se paket veličine L bita prenio na link brzine R b/s
- **Uskladišti i proslijedi:** kompletan paket mora doći do rutera prije nego što se on proslijedi na naredni link
- Kašnjenje od kraja do kraja = $2L/R$ (ako se zanemari kašnjenje uslijed propagacije)

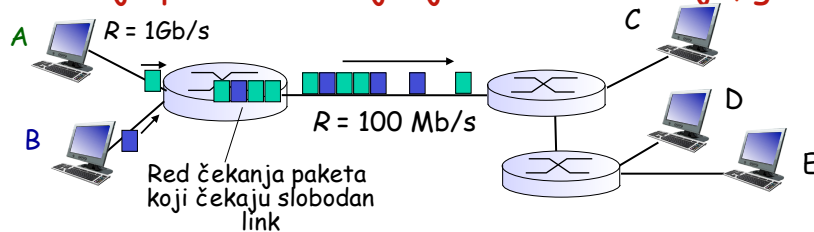
Primjer:

- $L = 7.5$ Mb
- $R = 1.5$ Mb/s
- Kašnjenje uslijed prenosa = 5 s

Uvod u računarske mreže 1-29

Uvod u računarske mreže

Komutacija paketa: kašnjenje u redu čekanja, gubici



Red čekanja i gubici:

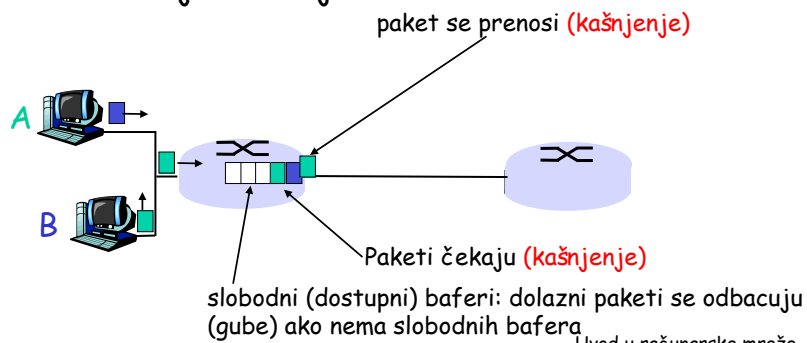
- ❖ Ako je dolazna brzina paketa približna brzini prenosa na linku u određenom intervalu vremena:
 - Paketi se smještaju u red čekanja i čekaju na oslobađanje linka
 - Paketi se odbacuju ako nema dovoljno memorijskog prostora u baferu

Uvod u računarske mreže 1-30

Uvod u računarske mreže

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

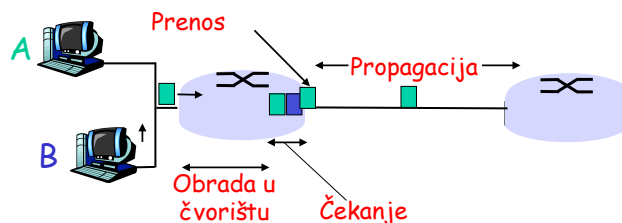
- Dolazna brzina paketa prevazilazi kapacitet odlaznog linka
- Paketi čekaju na slanje



Uvod u računarske mreže

Četiri izvora kašnjenja paketa

- 1. obrada u čvorištu:
 - Provjera greške na bitu
 - Utvrđivanje odlaznog linka
 - ...
- 2. Čekanje
 - Vrijeme čekanja za prenos na odlaznom linku
 - Zavisí od nivoa zagušenosti rutera
 - ...



Uvod u računarske mreže

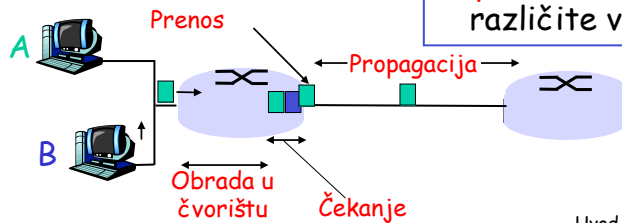
3. Kašnjenje uslijed prenosa:

- R = kapacitet linka (b/s)
- L = veličina paketa (bit)
- Vrijeme slanja jednog paketa po linku = L/R

4. Kašnjenje uslijed propagacije:

- d = dužina fizičkog linka
- s = brzina prostiranja po medijumu ($\sim 2 \times 10^8$ m/sec)
- Kašnjenje uslijed propagacije = d/s

Napomena: s i R su dvije različite veličine



Uvod u računarske mreže 1-33

Uvod u računarske mreže

$$d_{\text{cvoriste}} = d_{\text{obrada}} + d_{\text{cekanje}} + d_{\text{prenos}} + d_{\text{propagacija}}$$

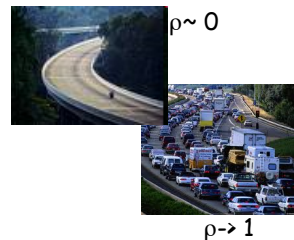
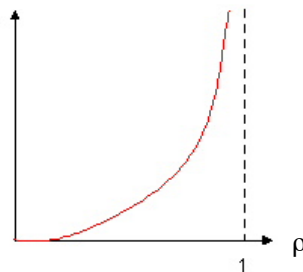
- d_{obrada} je vrijeme obrade
 - tipično nekoliko mikrosekundi ili manje
- d_{cekanje} je kašnjenje uslijed čekanja
 - zavisi od zagušenja
- d_{prenos} je kašnjenje uslijed prenosa
 - = L/R , značajno na linkovima malih kapaciteta
- $d_{\text{propagacija}}$ je vrijeme propagacije
 - nekoliko mikrosekundi do nekoliko stotina milisekundi

Uvod u računarske mreže 1-34

Uvod u računarske mreže

- R =kapacitet linka (b/s)
- L =veličina paketa (b)
- λ =srednja dolazna brzina paketa (pak/s)
- $\mu=R/L$ =srednja odlazna brzina paketa (pak/s)
- $\rho=\lambda/\mu$ =**Intenzitet saobraćaja**
- $\rho \sim 0$: srednje kašnjenje uslijed čekanja je malo
- $\rho \rightarrow 1$: kašnjenje počinje da raste
- $\rho > 1$: više saobraćaja "dolazi" nego što može da "ode", srednje kašnjenje je beskonačno!

Srednje kašnjenje uslijed čekanja



Uvod u računarske mreže 1-35

Uvod u računarske mreže

"Realna" Internet kašnjenja i rute

- 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 dostići ruter i na putu do destinacije
 - ruter i će vratiti paket pošiljaocu
 - pošiljalac mjeri vrijeme između slanja i odgovora.

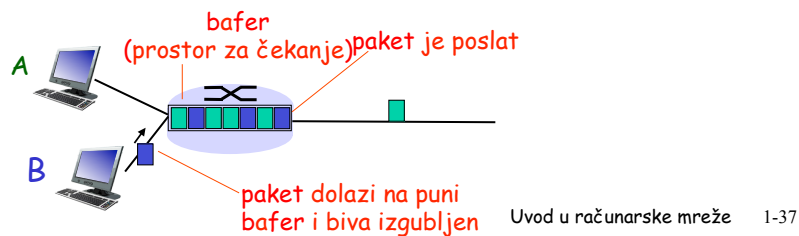


Uvod u računarske mreže 1-36

Uvod u računarske mreže

Gubitak paketa

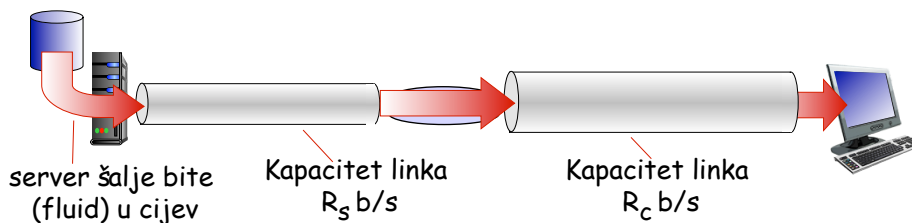
- Red čekanja (bafer) ima konačan kapacitet
- Kada paket dođe do popunjenog reda čekanja paket se odbacuje (gubitak)
- Izgubljeni paket se može ponovo poslati od strane prethodnog čvora, ili izvorišnog krajnjeg sistema ili se ponovo ne šalje



Uvod u računarske mreže

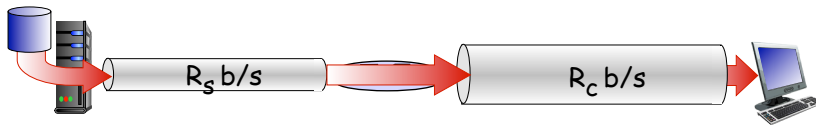
Propusnost

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

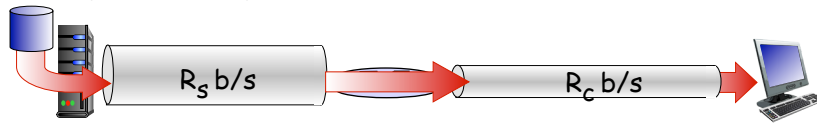


Uvod u računarske mreže

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



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



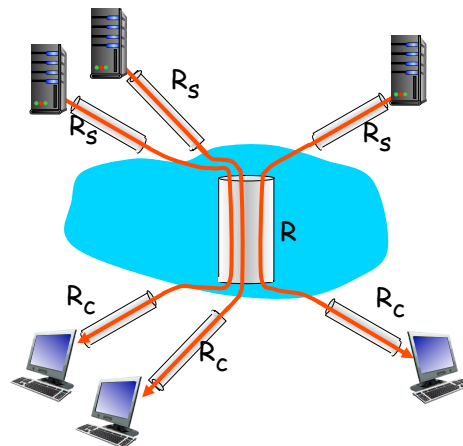
"bottleneck" link

link koji ograničava propusnost

Uvod u računarske mreže 1-39

Uvod u računarske mreže

- 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

Uvod u računarske mreže 1-40

Uvod u računarske mreže

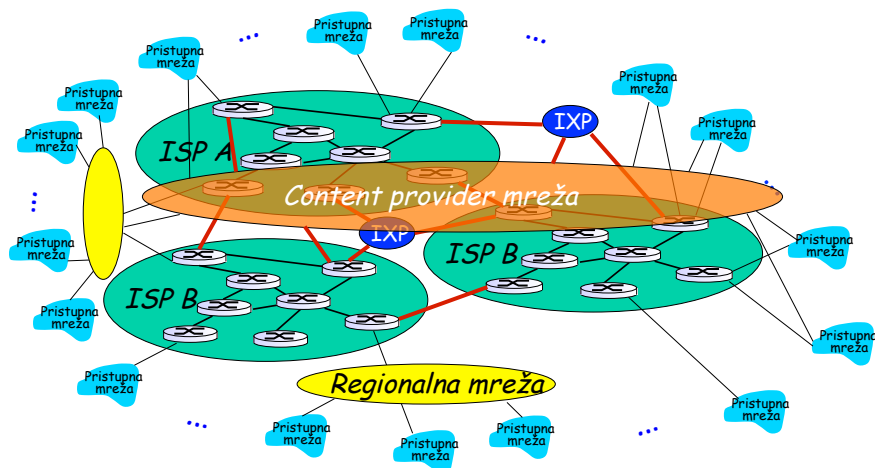
Internet struktura: mreža svih mreža

- ❖ Krajnji sistemi se povezuju na Internet preko **preko ISP-ova** (Internet Service Providers)
 - Rezidencijalni, kompanijski i univerzitetski ISP-ovi
- ❖ Pristupni ISP-ovi moraju biti međupovezani.
 - ❖ Tako da se između bilo koja dva hosta mogu razmjenjivati podaci
- ❖ Veoma kompleksna mreža svih mreža
 - ❖ Evolucija je uzrokovana **ekonomskim razlozima** i **nacionalnim politikama**

Uvod u računarske mreže 1-41

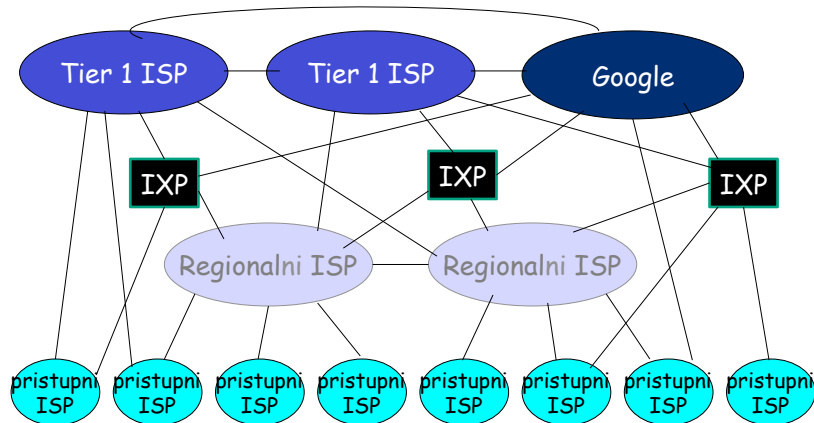
Uvod u računarske mreže

Content provider mreže (e.g., Google, Microsoft, Akamai) grade sopstvene mreže kako bi servise "primakle" korisnicima



Uvod u računarske mreže 1-42

Uvod u računarske mreže

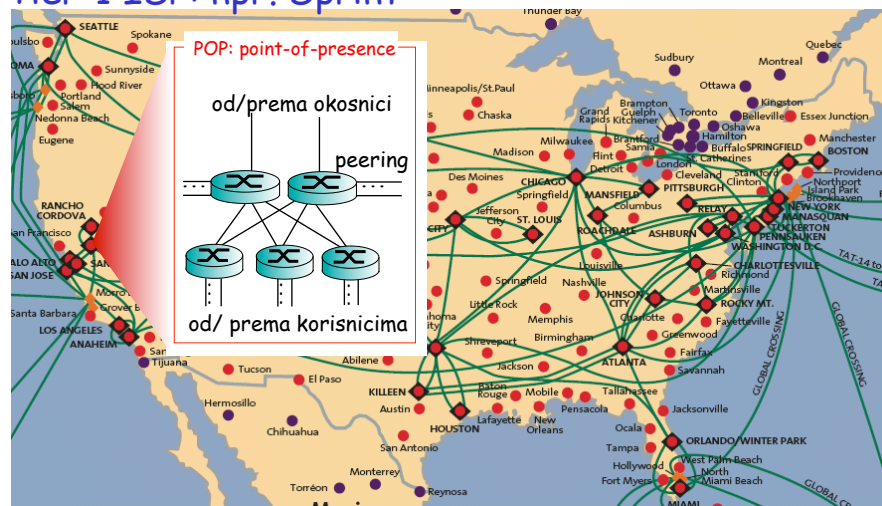


- U centru: mali broj veoma dobro povezanih velikih mreža
 - "tier-1" komercijalni ISP-ovi (npr. Level 3, Sprint, AT&T, NTT), nacionalno & međunarodno pokrivanje
 - Content provider mreža (npr. Google): privatna mreža koja povezuje data centre na Internet, obično zaobilazeći tier-1 i regionalne ISPOve

Uvod u računarske mreže 1-43

Uvod u računarske mreže

Tier-1 ISP: npr. Sprint



Uvod u računarske mreže 1-44

Uvod u računarske mreže

Zaštita računarskih mreža

- **Oblasti zaštite:**
 - Kako se mreža napada?
 - Kako se mreža može odbraniti?
 - Kako napraviti mrežu imunu na napade?
- **Na početku Internet nije dizajniran sa zaštitom u fokusu**
 - *Originalna vizija Interneta:* “grupa uzajamno pouzdanih korisnika povezanih na transparentnu mrežu” ☺
 - Dizajneri Internet protokola pokušavaju da prestignu bezbjedonosne izazove
 - Zaštita na svim nivoima!

Uvod u računarske mreže 1-45

Uvod u računarske mreže

Malware

- ❑ Može sa Internetu dospjeti u host pomoću:
 - *virusa*: samo-replicirajuća “zaraza” prijemom/ izvršavanjem programa (npr. e-mail attachment)
 - *worm*: samo-replicirajuća “zaraza” pasivnim prijemom objekta koji se samoizvršava
- ❑ **spyware malware** može evidentirati unos sa tastature, posjećene web sajtove, slati prikupljene informacije
- ❑ inficirani host može postati **botnet**, koji se koristi za spamovanje ili DDoS napade

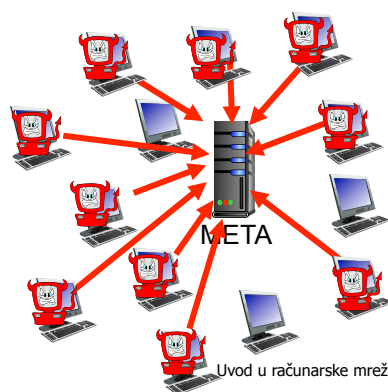
Uvod u računarske mreže 1-46

Uvod u računarske mreže

Napad na server ili mrežnu infrastrukturu

Denial of Service (DoS): napadači resurse mreže (serveri ili mrežni kapaciteti) čine nedostupnim legitimnim korisnicima preopterećenjem vještački generisanim saobraćajem

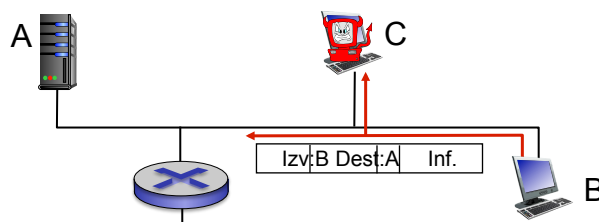
1. Izbor mete
2. Upad u hostove oko mete (botnet)
3. Slanje paketa meti od strane kompromitovanih hostova



Uvod u računarske mreže

Packet "sniffing":

- Zajednički medijum za prenos (dijeljeni Ethernet, bežični link)
- Promiskuitetni mrežni interfejs analizira sve pakete koji se prenose



- Wireshark software je primjer bezplatnog packet-sniffera

Uvod u računarske mreže

IP spoofing: slanje paketa sa netačnom izvorišnom adresom

