

Računarske mreže

(Studijski program: Telekomunikacije)

Prof.dr Igor Radusinović

igorr@ac.me

dr 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 alatima za opisivanje pojava na Internetu
- ❑ Sticanje osnovnih praktičnih znanja iz ove oblasti

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 čovječanstvo
- ❑ 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

Informacije o kursu

- ❑ Kome je namijenjen kurs?
 - Studentima specijalističkih i master 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, 8th edition, 2020
 - Computer Networks: A Systems Approach, Larry Peterson and Bruce Davie, 2021 (<https://book.systemsapproach.org/index.html>)
 - WWW
 - Zabilježke sa predavanja

Informacije o kursu (više)

Način polaganja:

	<u>broj</u>	<u>% ocjene</u>
Pitalice	5	10%
Kolokvijum	1	40%
Seminarski rad	1	20%
Završni ispit	1	40%

Uvod u računarske mreže

1-5

5

Pregled kursa:

Priprema nedjelja	Priprema i upis semestra
I nedjelja	Uvod u računarske mreže.
II nedjelja	Principi protokola nivoa aplikacije. HTTP.
III nedjelja	FTP. SMTP. DNS. P2P
IV nedjelja	Principi protokola nivoa transporta. Nekonektivni transportni servis (UDP)
V nedjelja	Konektivni transportni servis (TCP).
VI nedjelja	TCP kontrola zagušenja. QUIC.
VII nedjelja	KOLOKVIJUM
VIII nedjelja	Principi nivoa mreže
IX nedjelja	IPv4
X nedjelja	DHCP. NAT. ICMP. IPv6
XI nedjelja	Protokoli rutiranja. OSPF. BGP. Mrežni menadžment.
XII nedjelja	Principi protokola nivoa linka. MAC. ARP. Ethernet. VLAN
XIII nedjelja	WLAN. 4G/5G. Mobilnost u računarskim mrežama
XIV nedjelja	Zaštita računarskih mreža
XV nedjelja	Seminarski
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

6

Pregled kursa:

Glava 1: Uvod

- ❑ Šta je Internet, šta su protokoli?
- ❑ Ivice mreže, mrežno jezgro, mrežni pristup
- ❑ Performanse računarskih mreža
- ❑ Internet okosnica,
- ❑ Internet struktura
- ❑ Sigurnost računarskih mreža

Pregled kursa:

Gava 2: Nivo aplikacije

- ❑ Principi protokola nivoa aplikacije
- ❑ Web i HTTP
- ❑ FTP
- ❑ Elektronska pošta na Internetu (SMTP, POP3, IMAP)
- ❑ DNS
- ❑ P2P
- ❑ Video streaming i CDN

Pregled kursa :

Glava 3: Nivo transporta

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

Pregled kursa :

Glava 4: Mrežni nivo

- ❑ Principi nivoa mreže
- ❑ IPv4 (Internet Protocol).
- ❑ DHCP. NAT.
- ❑ ICMP
- ❑ IPv6
- ❑ Rutiranje na Internet-u
- ❑ Protokoli rutiranja
- ❑ Mrežni menadžment

Pregled kursa :

Glava 5: Nivo linka, LAN-ovi

- Principi nivoa linka
- MAC. ARP. Ethernet. VLAN
- WLAN
- 4G/5G
- Mobilnost u računarskim mrežama

Pregled kursa :

Glava 6: Zaštita računarskih mreža

- Principi zaštite računarskih mreža
- Zaštita e-maila
- Zaštita TCP konekcije
- Zaštita nivoa mreže
- Zaštita u bežičnim računarskim mrežama
- Firewall i IDS

Laboratorijske vježbe

- I. Uvod u Python programiranje,
- II. Socket programming,
- III. Mininet
- IV. Konfiguracija switcha
- V. Konfiguracija routera

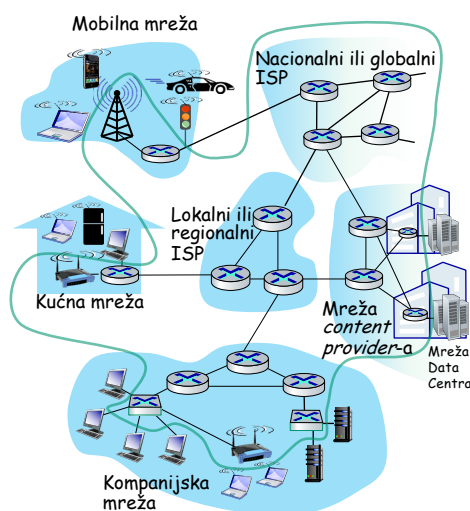
Uvod u računarske mreže 1-13

13

Uvod u računarske mreže

Šta je Internet?

- PC
 - server
 - wireless laptop
 - smartphone
 - Bežični linkovi
 - Žični linkovi
 - Access point
 - Bazna stanica
- Milijarde povezanih računara:
 - *Host = krajnji sistem*
 - Izvršava *mrežne aplikacije*
 - *Komunikacioni linkovi*
 - Optičko vlakno, bakarna upredena parica, koaksijalni kabal, radio, ...
 - Brzina prenosa: *bandwidth*
 - *Komutatori paketa: prosleđuju pakete (djelove poruka)*
 - *ruteri*
 - *komutatori*



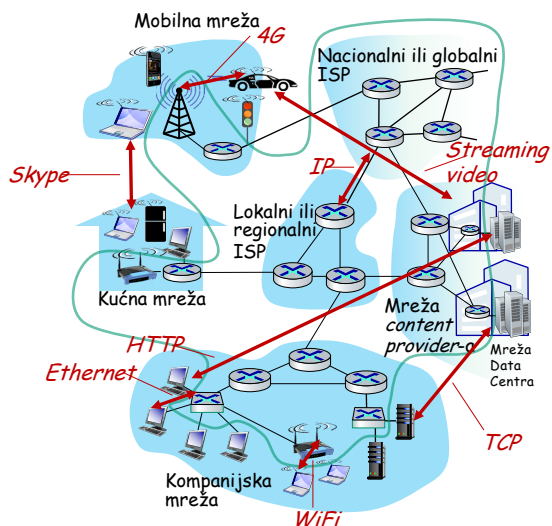
Uvod u računarske mreže 1-14

14

Uvod u računarske mreže

Iz čega se sastoji Internet u logičkom smislu?

- **Protokoli** kontrolišu slanje i prijem poruka
 - npr, TCP, IP, HTTP, Ethernet, WiFi, 4G, Skype, streaming video
- **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 1-15

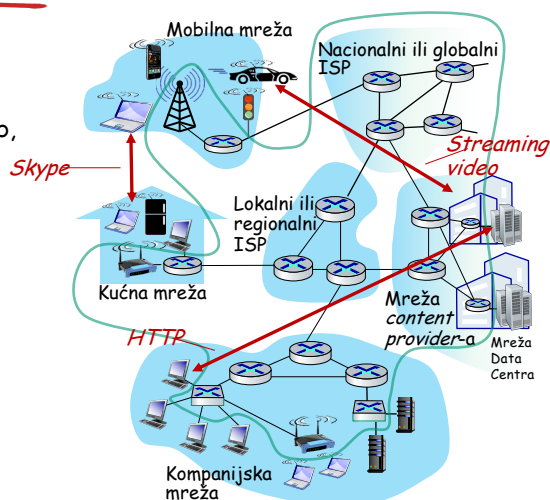
15

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)
- **pragmabilni interfejs** do aplikacija
 - Aplikacije šalju i primaju podatke sa Interneta
 - Omogućava opcije servisa, analogne poštanskom servisu



Uvod u računarske mreže 1-16

16

Uvod u računarske mreže

Detaljniji pogled na mrežnu strukturu

- **Mrežna ivica:**
 - aplikacije
 - hostovi (klijenti i serveri)
 - KS, P2P, hibridni model
- **Mrežna okosnica:**
 - međupovezani ruteri
 - mreža međupovezanih mreža
- **Pristupna mreža, fizički medijum:**
 - Žični linkovi
 - Bežični linkovi



Uvod u računarske mreže 1-17

17

Uvod u računarske mreže

Pristupne mreže i fizički medijum

Vrste pristupnih mreža

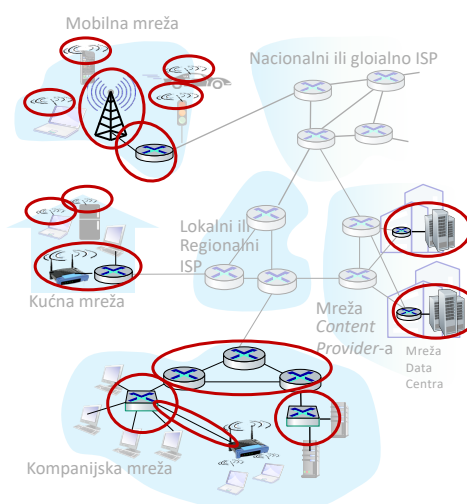
- Rezidencijalne pristupne mreže
- Institucionalne pristupne mreže (ustanove, kompanije)
- Mobilne pristupne mreže

Važno je obratiti pažnju na

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

Popularni pristupi

- DSL
- Kablovska
- Optičko vlakno
- Bežični pristup (WiFi, 4G, 5G...)

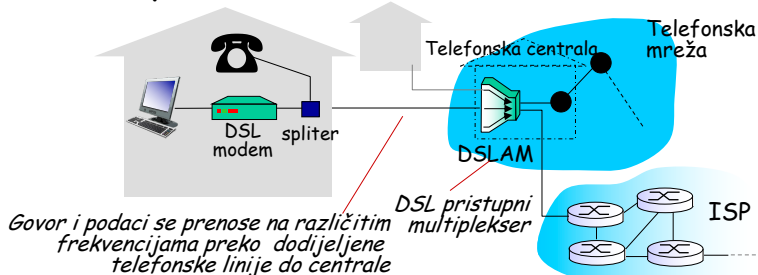


Uvod u računarske mreže 1-18

18

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
- < 100 Mb/s brzina prenosa na upstream-u (tipično < nekoliko Mb/s)
- < 300 Mb/s brzina prenosa na downstream-u (tipično < nekoliko desetina Mb/s)
- ADSL, VDSL,...

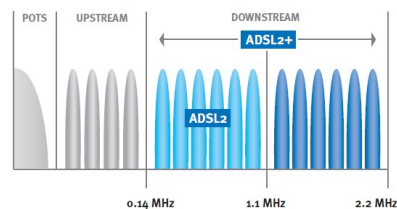
Uvod u računarske mreže 1-19

19

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



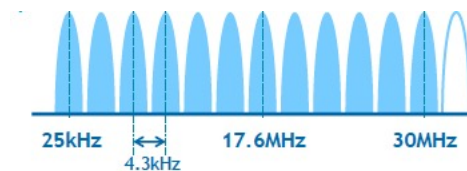
Uvod u računarske mreže 1-20

20

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)

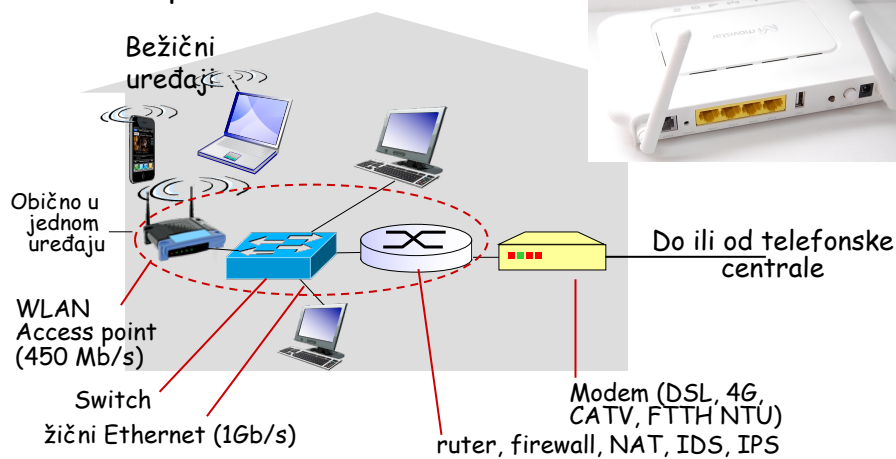


Uvod u računarske mreže 1-21

21

Uvod u računarske mreže

Pristupna mreža: Kućna mreža



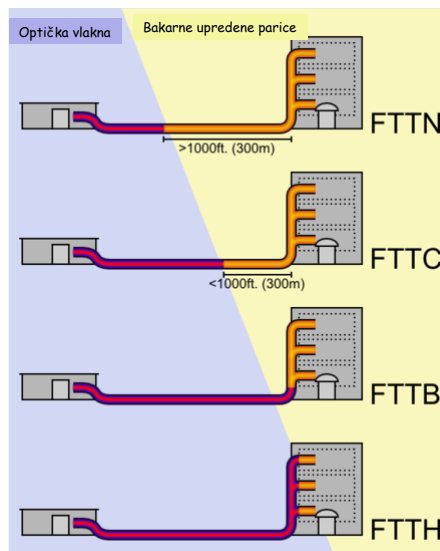
Uvod u računarske mreže 1-22

22

Uvod u računarske mreže

Optička pristupna mreža

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

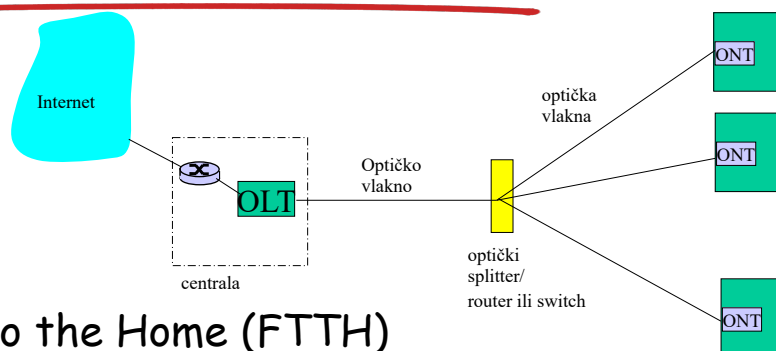


Uvod u računarske mreže

1-23

23

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*)

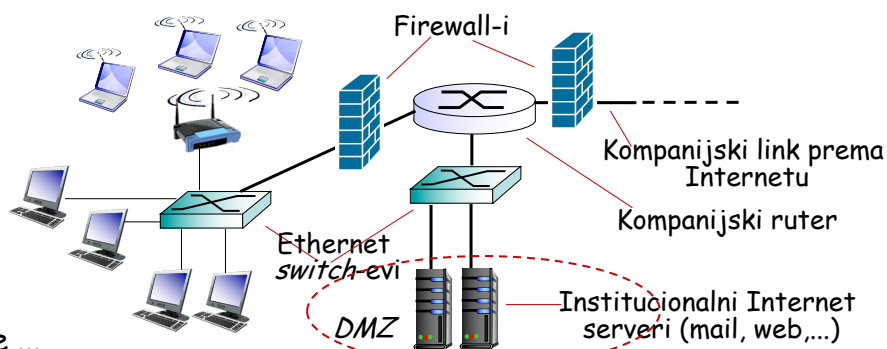
Uvod u računarske mreže

1-24

24

Uvod u računarske mreže

Kompanijska pristupna mreža



Institucije, ustanove,...

- 10 Mb/s, 100Mb/s, 1Gb/s, 10Gb/s
- Danas se krajnji sistemi tipično povezuju na Ethernet *switch* ili WLAN *Access Point*
- DMZ (*DeMilitarized Zone*)
- Tronivovska hijerarhijska mreža

Uvod u računarske mreže 1-25

25

Uvod u računarske mreže

Bežične pristupne mreže

- Dijeljeni *bežični pristup preko access point-a* ili bazne stanice

Wireless LAN:

- Adhoc ili pristup preko *access point-a*
- Unutar objekata (30m) ili na otvorenom prostoru (100m)
- WiFi: IEEE 802.11 b/g (11/54 Mb/s)
- WiFi4: IEEE 802.11. n (600Mb/s)
- WiFi5: IEEE 802.11ac (433Mb/s - 6,77Gb/s)
- WiFi6: IEEE 802.11ax (11Gb/s)

Wireless WAN

- Pristup preko bazne stanice
- Celularni pristup koji nudi operator
- Pokrivanje bazne stanice može biti od jedne prostorije do nekoliko kilometara
- 3.9G: LTE (DL-100Mb/s, UL-50Mb/s, 5ms)
- 4G: LTE-A (DL-1Gb/s za stacionarne korisnike)
- 5G: (DL - 5Gb/s u milimetarskom opsegu)



Prema Internetu

<https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/catalyst-9100ax-access-points/nb-06-cat-9130-ser-ap-ds-cte-en.html>



Prema Internetu

Uvod u računarske mreže 1-26

26

Uvod u računarske mreže

Mreža Data Centra

- Velike brzine prenosa (desetine i stotine Tb/s) koji stotine i hiljade servera povezuju međusobno i na Internet



Massachusetts Green High Performance Computing Center (mghpcc.org)



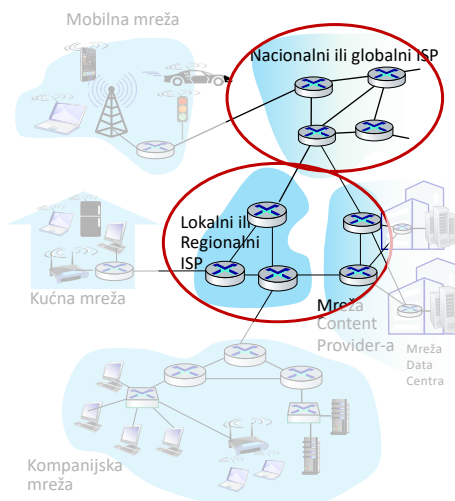
Uvod u računarske mreže 1-27

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
 - Paket se sastoji od
 - Zaglavlja (*OverHead*) koje sadrže informacije koje su potrebne mreži da prenese paket od izvora do destinacije (kontrolne informacije)
 - Korisnog dijela (*Payload*) koji sadrži dio poruke (korisničke informacije)
 - Paketi se prosleđuju od komutatora paketa do komutatora paketa



Uvod u računarske mreže 1-28

28

Performanse računarskih mreža

- Kašnjenje
- Gubici
- Propusnost

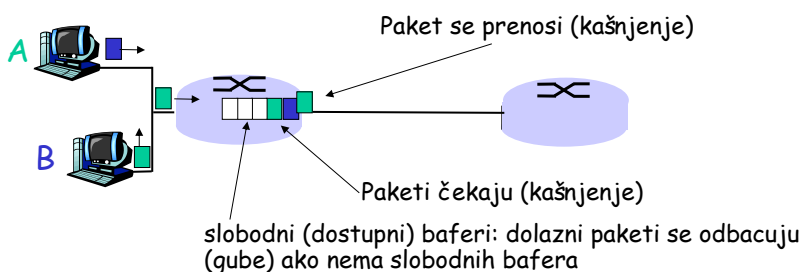
Uvod u računarske mreže1-29

29

Kako nastaju gubici i kašnjenje?

Paketi se smještaju u bafere rutera i formiraju redove čekanja (*queue*)

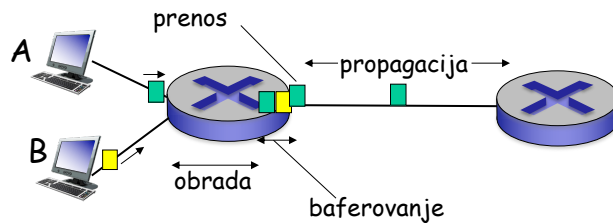
- Paket se smješta u bafer ako odlazni link nije slobodan
- Ako je dolazna brzina paketa približna ili prevazilazi brzinu prenosa odlaznog linka bafer počinje da se puni
- Ako paket koji dolazi zatiče pun bafer onda on, po pravilu, biva odbačen
- Paket se može izgubiti i na linku.



Uvod u računarske mreže1-30

30

Četiri izvora kašnjenja paketa



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

d_{obrada} : obrada paketa

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

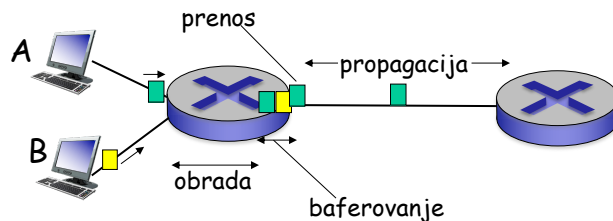
$d_{\text{baferovanje}}$: čekanje u baferu

- Vrijeme čekanja pri odlasku na link
- Zavisí od zauzetosti bafera, odnosno odnosa dolazne i odlazne brzine

Uvod u računarske mreže 1-31

31

Četiri izvora kašnjenja paketa



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

d_{prenosa} : kašnjenje uslijed prenosa:

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

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

- 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

Uvod u računarske mreže 1-32

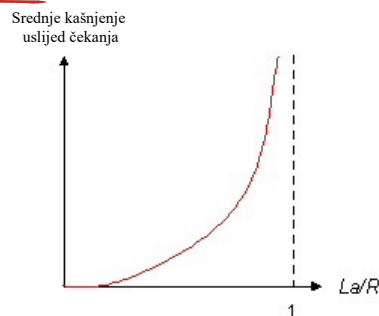
32

Kašnjenje usled čekanja u baferu

- R =kapacitet linka (b/s)
- L =veličina paketa (b)
- a =srednja dolazna brzina paketa (pak/s)

$$\frac{L \cdot a}{R} ; \frac{\text{Dolazna brzina}}{\text{Odlazna brzina}} \quad \text{"Intenzitet saobraćaja"}$$

- $La/R \sim 0$: srednje kašnjenje uslijed čekanja je malo
- $La/R \rightarrow 1$: kašnjenje postaje veliko
- $La/R > 1$: više saobraćaja "dolazi" nego što može da "ode", srednje kašnjenje je beskonačno!



Uvod u računarske mreže 1-33

33

"Realna" Internet kašnjenja i rute

- Kako izgledaju "realna" Internet kašnjenja & gubici?
- **Traceroute**: daje mjerenja kašnjenja od izvora do rutera duž Internet puta (od izvora do destinacije i nazad). 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.



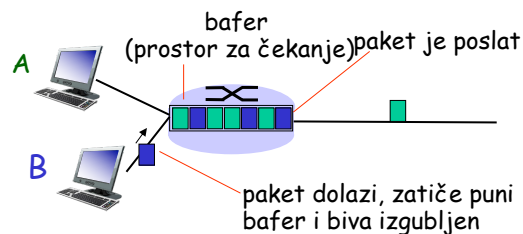
www.traceroute.org

Uvod u računarske mreže 1-34

34

Gubitak paketa

- ❑ Bafer je ograničena memorija tako da red čekanja ima konačan broj mjesta za pakete
- ❑ Kada paket dođe do popunjenog reda čekanja paket se odbacuje (javlja se gubitak paketa)
- ❑ Izgubljeni paket se može ponovo poslati od strane prethodnog čvora, ili izvorišnog krajnjeg sistema ili se ponovo ne šalje
- ❑ Gubitak paketa se modeluje vjerovatnoćom gubitka paketa koja predstavlja odnos broja izgubljenih i broja pristiglih paketa
- ❑ Vjerovatnoća gubitka paketa treba da bude reda 10^{-8}

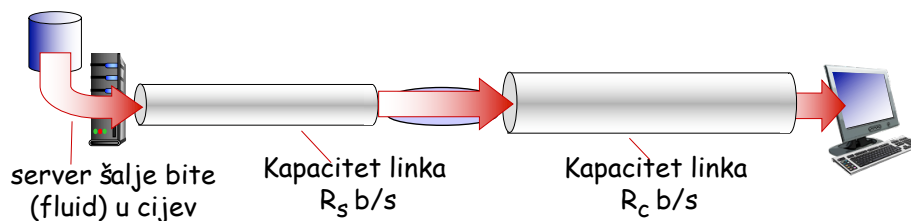


Uvod u računarske mreže 1-35

35

Propusnost

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

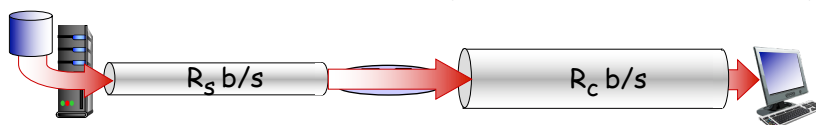


Uvod u računarske mreže 1-36

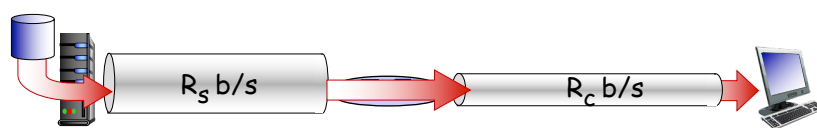
36

Propusnost (više)

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



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



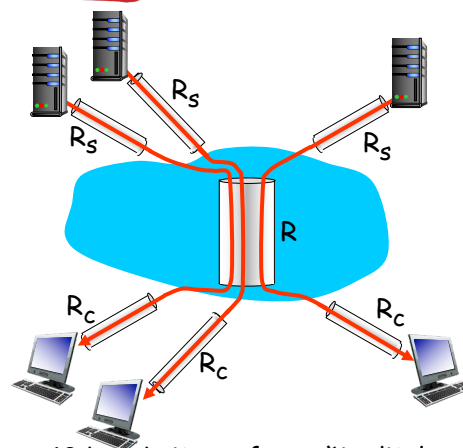
"bottleneck" link
link koji ograničava propusnost

Uvod u računarske mreže 1-37

37

Propusnost: Internet scenario

- 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

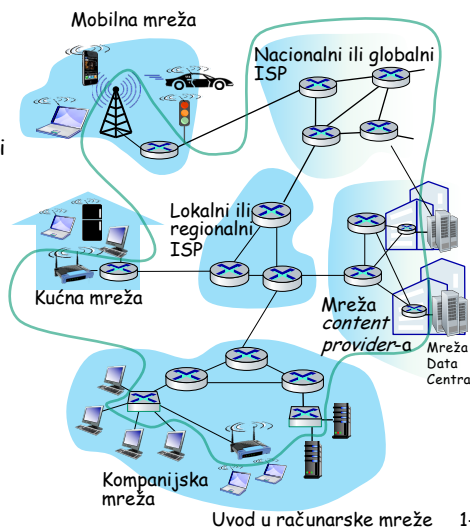
Uvod u računarske mreže 1-38

38

Uvod u računarske mreže

Internet struktura: mreža svih mreža

- ❑ Krajnji sistemi se povezuju na Internet preko ISP-ova (Internet Service Provider)
 - 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

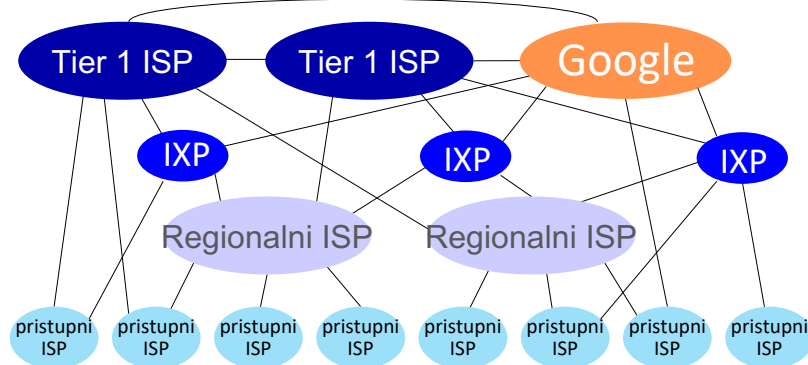


Uvod u računarske mreže 1-39

39

Uvod u računarske mreže

Internet struktura: mreža svih mreža



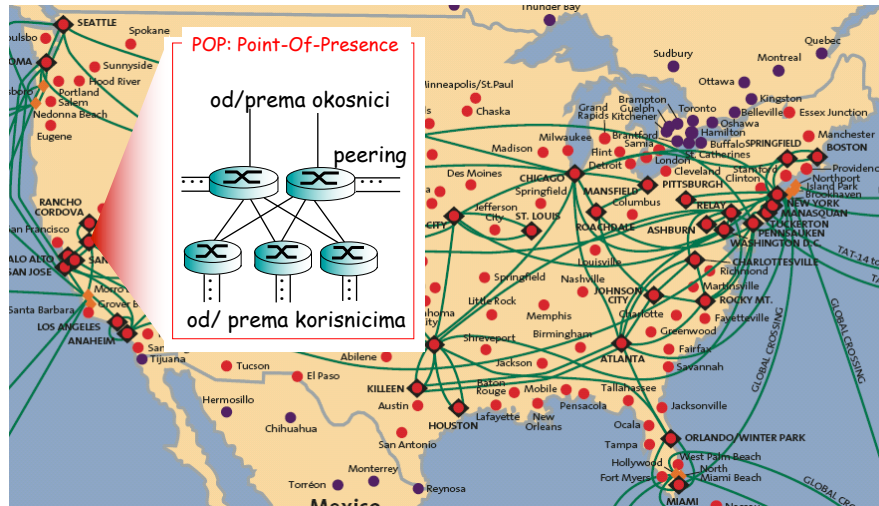
- ❑ U centru: mali broj veoma dobro povezanih velikih mreža
 - "tier-1" komercijalni ISP-ovi (npr. Level 3, Sprint, AT&T, NTT, Deutsche Telekom,...), nacionalno i međunarodno pokrivanje
 - Content provider mreža (Google, Facebook,...): privatna mreža koja povezuje data centre na Internet, obično zaobilazeći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

Uvod u računarske mreže 1-40

40

Uvod u računarske mreže

Tier-1 ISP: npr. Sprint



Uvod u računarske mreže

1-41

41

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: grupa uzajamno pouzdanih korisnika povezanih na "nevidljivu" mrežu 😊
 - Dizajneri Internet protokola neprekidno pokušavaju da prestignu bezbjedonosne izazove
 - Zaštita na svim nivoima!

Uvod u računarske mreže

1-42

42

Uvod u računarske mreže

Malware

- Može sa Interneta 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,
 - evidentirati posjećene web sajtove,
 - slati prikupljene informacije,...
- Inficirani host može postati dio **botnet**-a, koji se koristi za spamovanje ili DDoS napade
 - Mirai (na japanskom "za budućnost") pretvara Linuxov host u BOT koji se može koristiti za napade velikih razmjera

Uvod u računarske mreže 1-43

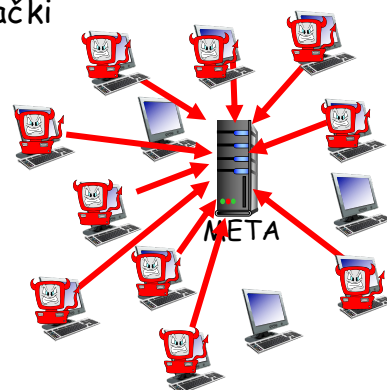
43

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 velikog broja paketa meti od strane kompromitovanih hostova



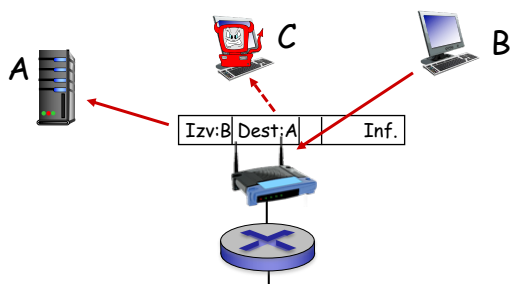
Uvod u računarske mreže 1-44

44

Uvod u računarske mreže

Packet "sniffing":

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



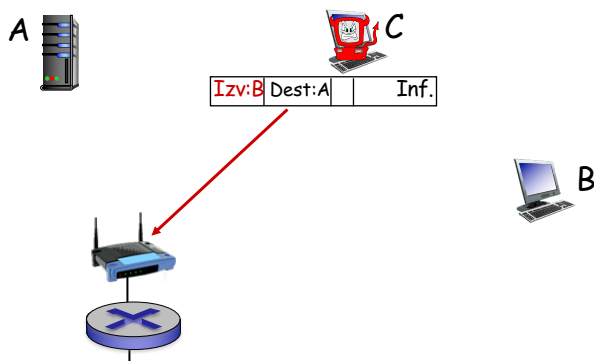
- Wireshark software je primjer bezplatnog *packet sniffer* programa

Uvod u računarske mreže 1-45

45

Uvod u računarske mreže

IP spoofing: slanje paketa sa netačnom izvorišnom adresom



Uvod u računarske mreže 1-46

46

Linije odbrane:

- ❑ **autentikacija:** dokazivanje identiteta
- ❑ **povjerljivost:** enkripcija
- ❑ **provjera integriteta:** digitalni potpis/detekcija mijenjanja podataka
- ❑ **restrikcije pristupa:** passwordom zaštićeni VPN
- ❑ **firewall:** specializovani hardver koji filtrira dolazne pakete uvodeći ograničenje pošiljaocu, prijemnoj strani i aplikacijama

Introduction: 1-47