

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
 - Zabilješke sa predavanja

Informacije o kursu (više)

Način polaganja:

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

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. 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 IPv4
IX nedjelja	DHCP. NAT. ICMP. IPv6
X nedjelja	Protokoli rutiranja. OSPF. BGP. Mrežni menadžment.
XI nedjelja	Principi protokola nivoa linka. MAC. ARP. Ethernet.
XII nedjelja	VLAN. MPLS. Mreža datacentra
XIII nedjelja	WLAN. 4G/5G. Mobilnost u računarskim mrežama
XIV nedjelja	Zaštita računarskih mreža
XV nedjelja	Odbrana seminarskih radova
XVI nedjelja	Završni ispit
Završna nedjelja	Ovjera semestra i upis ocjena.
XVIII-XXI nedjelja	Dopunska nastava i popravni ispitni rok.

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

Šta je Internet?



- Milijarde povezanih uređaja:

- *Host = krajnji sistem*
- Izvršava *mrežne aplikacije*

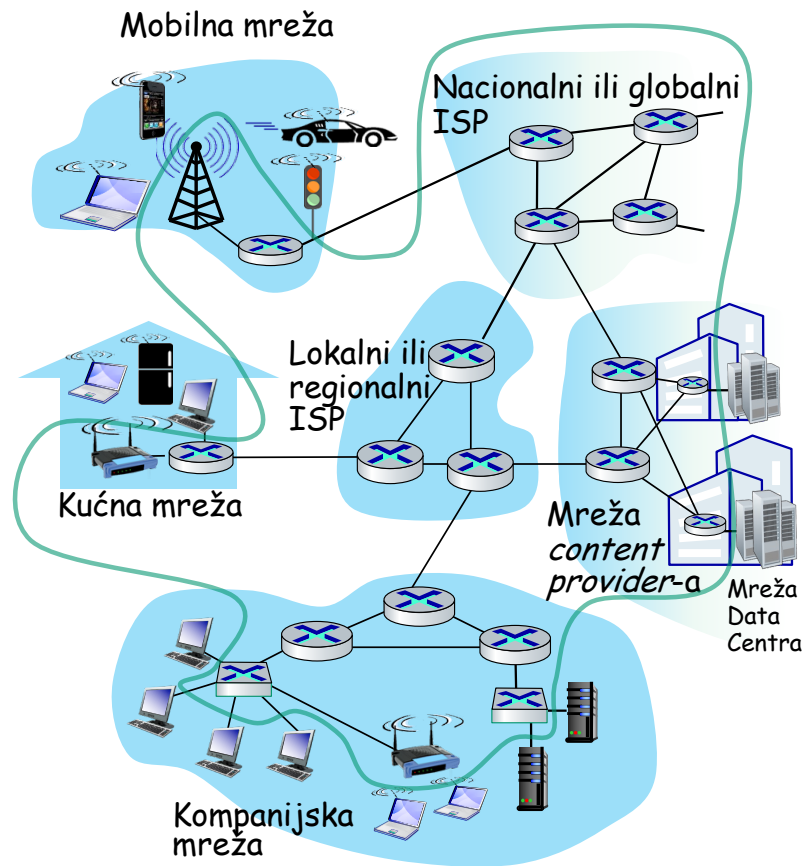
- *Komunikacioni linkovi*

- Optičko vlakno, bakarna upredena parica, koaksijalni kabal, radio, ...
- Brzina prenosa: *bandwidth*

- *Komutatori paketa*: prosleđuju pakete (djelove poruka)

- *ruteri*
- *komutatori*

- *Mreže*: međupovezani uređaji, ruteri i linkovi kojima upravlja neka organizacija



Internet uređaji



Amazon Echo



Internet frižider



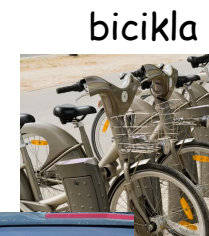
IP okvir za slike



Pacemaker i monitor



Strujomjer



bicikla



Web taster + prognoza vremena



automobil



sigurnosna kamera



Slingbox: daljinski kontrolisana kablovska TV



AR uređaji



skuter



Internet telefoni



Konzole za igru



senzori



Fitbit

Drugi?

Uvod u računarske mreže

Uvod u računarske mreže

Iz čega se sastoji Internet u logičkom smislu?

□ **Protokoli** kontrolišu slanje i prijem poruka

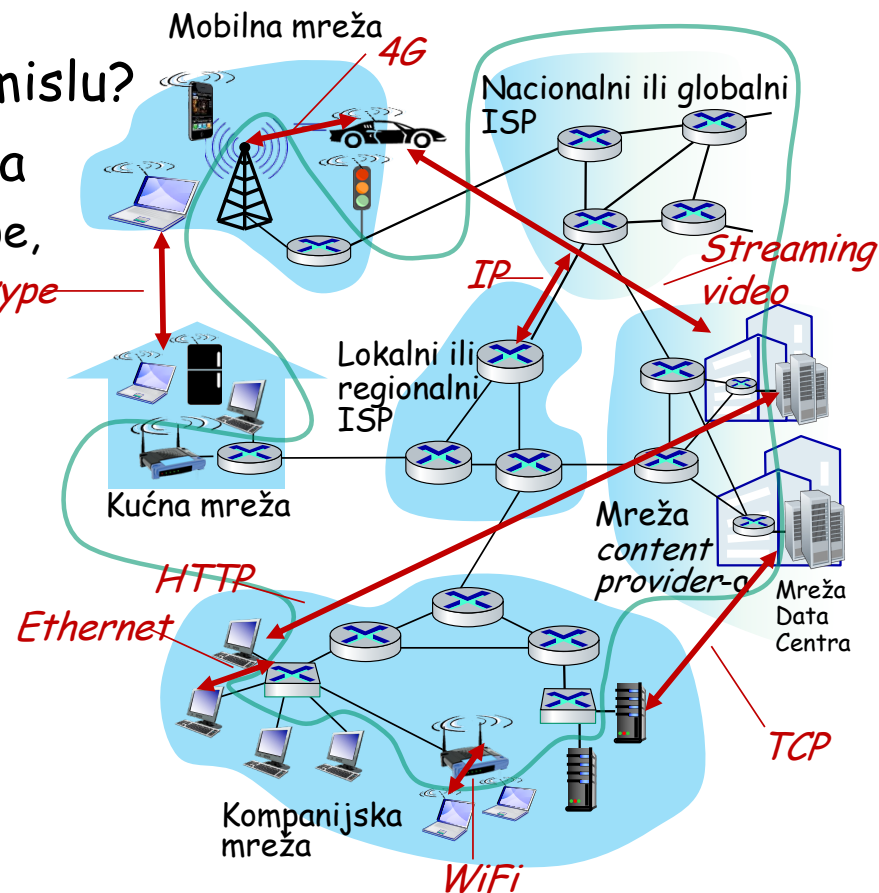
- npr, TCP, IP, HTTP, Ethernet, WiFi, 4G, Skype, streaming video

□ **Internet: “mreža svih mreža”**

- Labava hijerarhija oivezanih ISP-ova
 - javni Internet
 - privatni intranet

□ **Internet standardi**

- RFC: *Request for comments*
- IETF: *Internet Engineering Task Force*

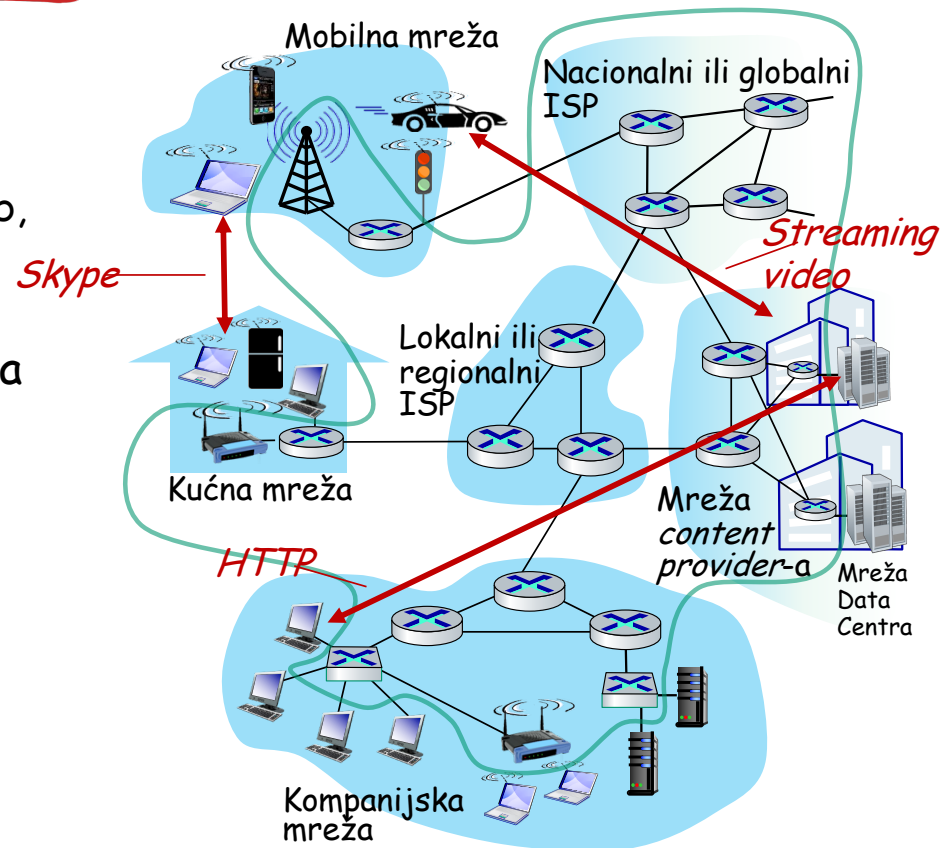


Uvod u računarske mreže

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,...)
- **programabilni interfejs** do distribuiranih aplikacija
 - Aplikacije šalju i primaju podatke preko Interneta
 - Omogućava opcije servisa, analogne poštanskom servisu



Uvod u računarske mreže

Detaljniji pogled na mrežnu strukturu

□ Mrežna ivica:

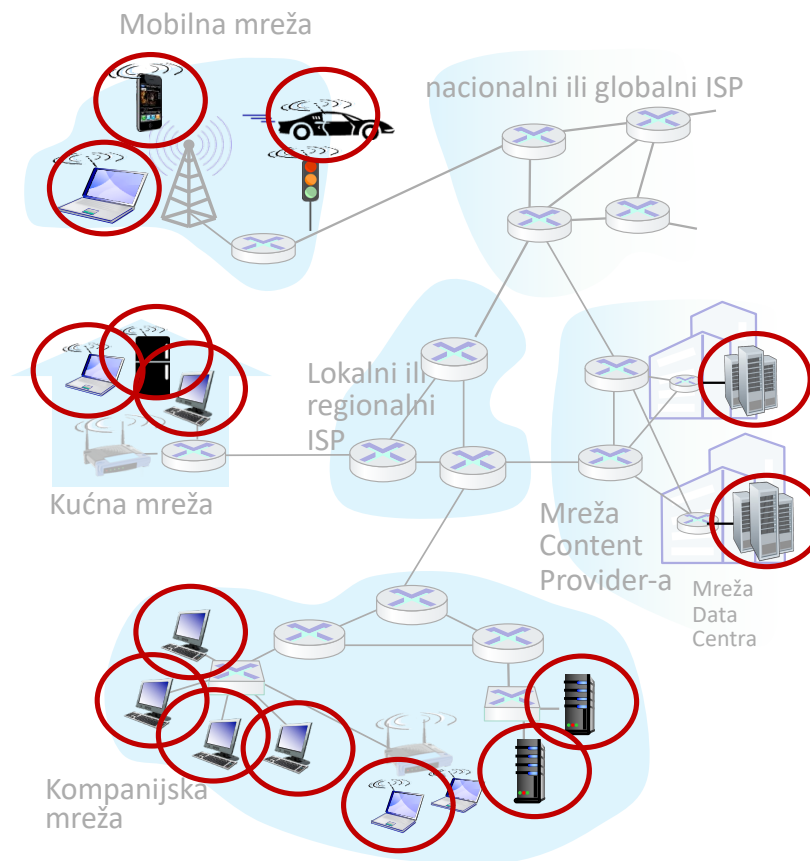
- aplikacije
- hostovi (klijenti i serveri)
- Serveri u data centrima
- KS, P2P, hibridni model

□ Mrežna okosnica:

- međupovezani ruteri
- mreža međupovezanih mreža

□ Pristupna mreža, fizički medijum:

- Žični linkovi
- Bežični linkovi



Uvod u računarske mreže

Pristupne mreže i fizički medijum

Vrste pristupnih mreža

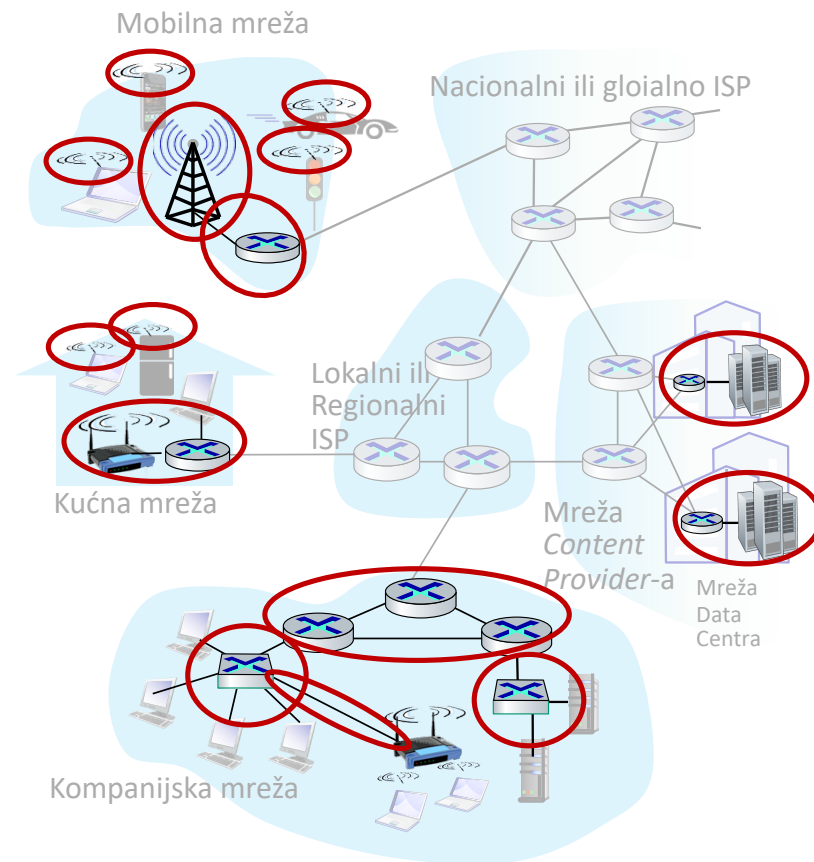
- ❑ Rezidencijalne pristupne mreže
- ❑ Institucionalne pristupne mreže (ustanove, kompanije)
- ❑ Bežične pristupne mreže (WiFi, 4G/5G)

Važno je obratiti pažnju na

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

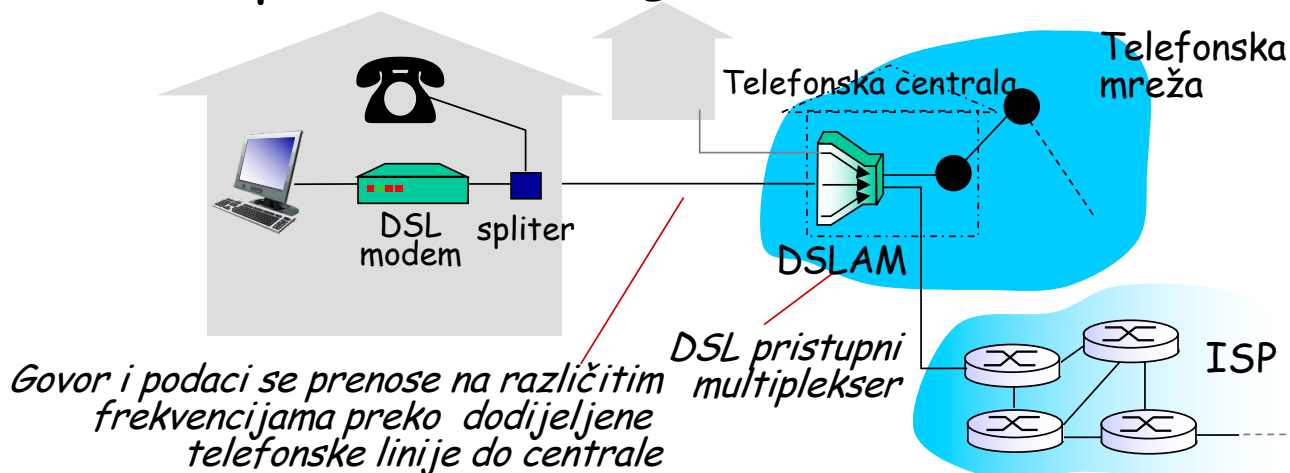
Popularni pristupi

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



Uvod u računarske mreže

Pristupna mreža: Digital Subscriber Line (DSL)

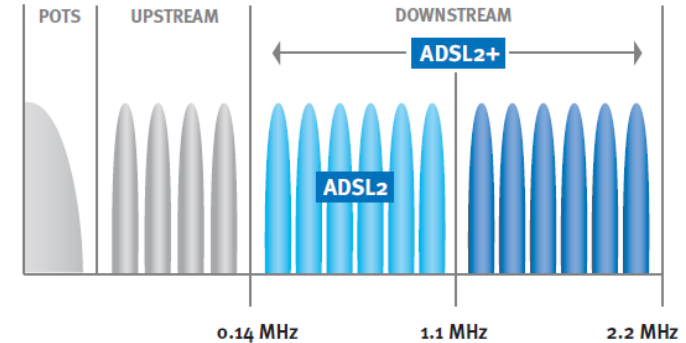


- koristi *postojeću* telefonsku liniju do DSLAM-a u telefonskoj centrali
 - Podaci se preko DSL linije prenose do Interneta
 - Govor se preko DSL linije prenosi do telefonske mreže
- < 100 Mb/s brzina prenosa na upstream-u (tipično < nekoliko Mb/s)
- < 300 Mb/s brzina prenosa na downstream-u (tipično < nekoliko desetina Mb/s)
- ADSL, VDSL,...

Uvod u računarske mreže

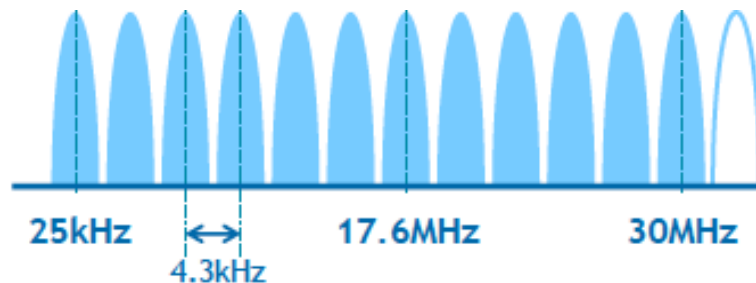
ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)

- 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



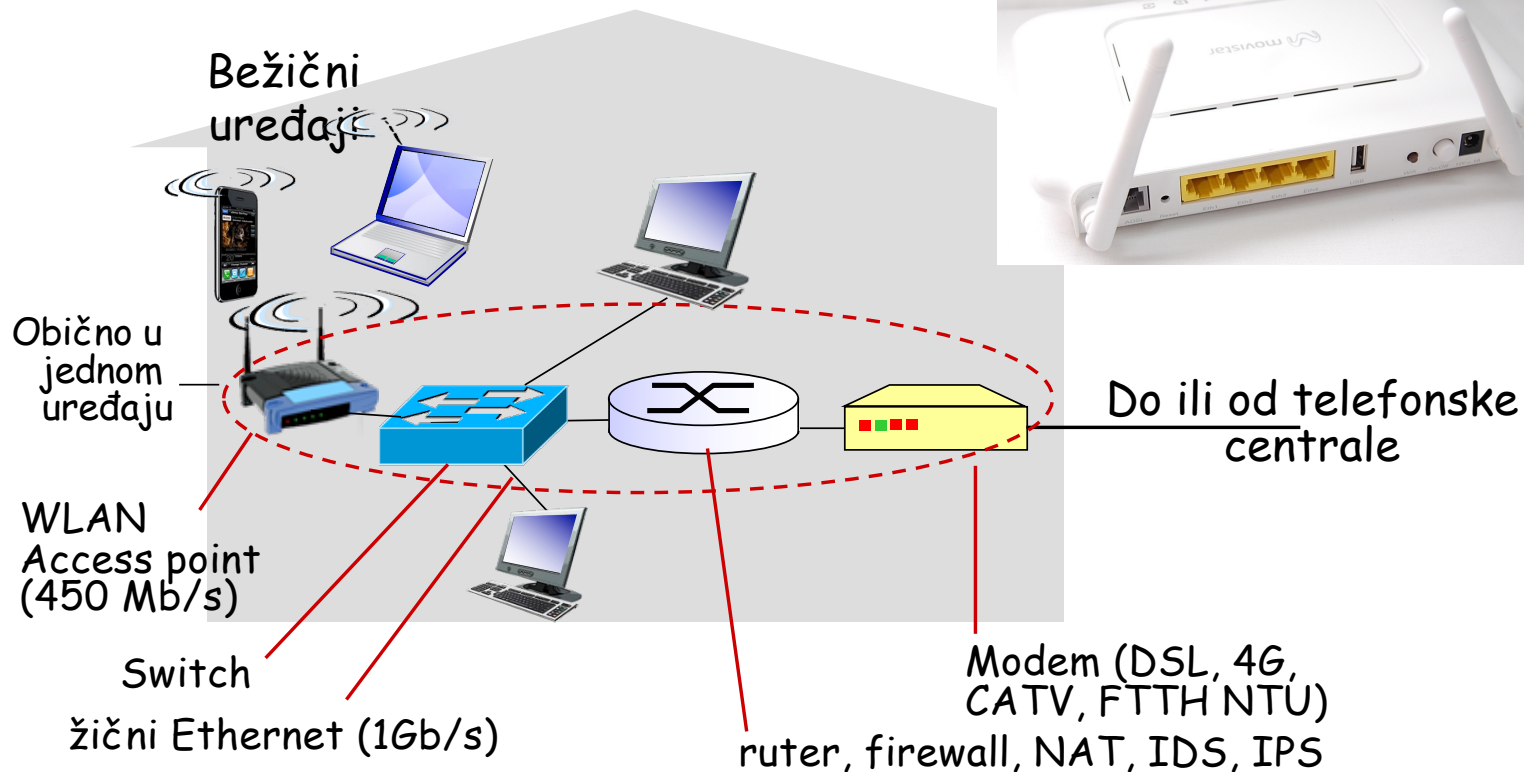
Uvod u računarske mreže

- 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

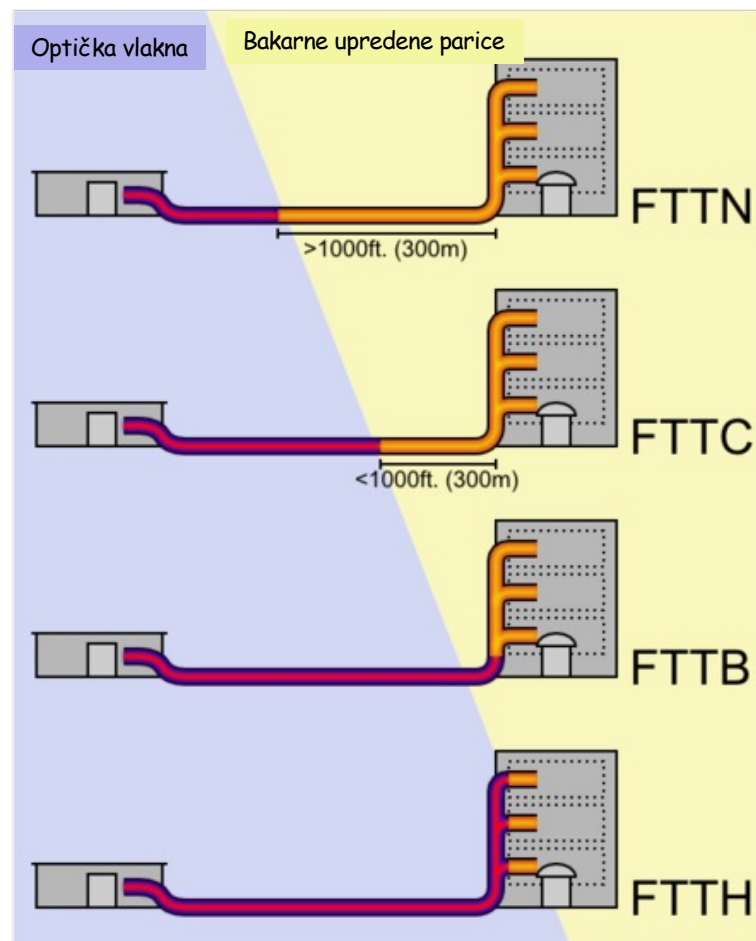
Pristupna mreža: Kućna mreža



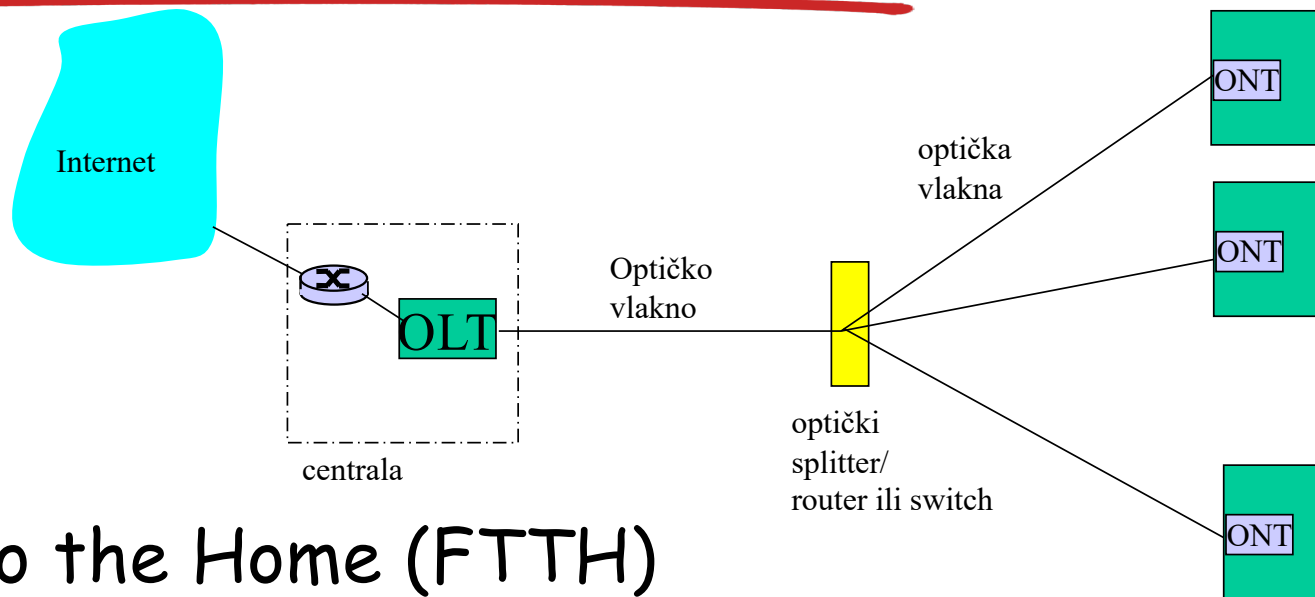
Uvod u računarske mreže

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

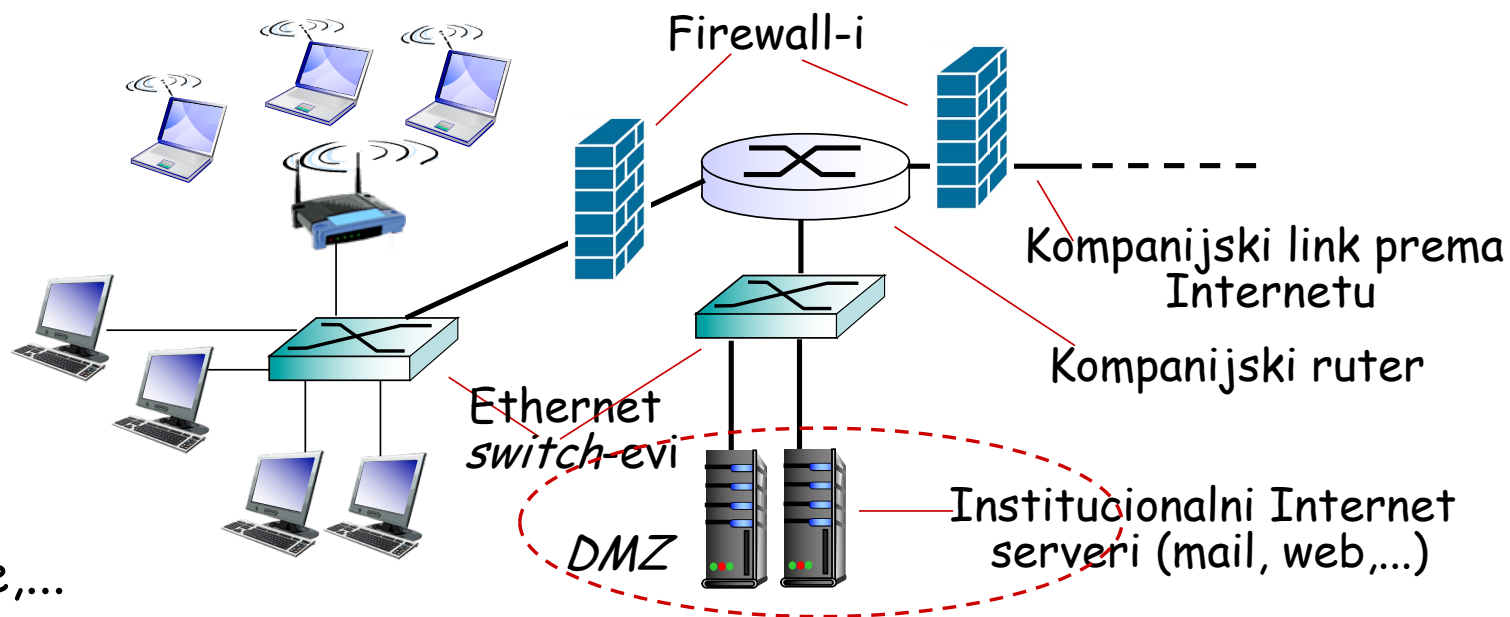


Fiber to the Home (FTTH)

- ❑ Optički linkovi od centrale do rezidencijalnog objekta
- ❑ Dvije konkurentske 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

Kompanijska pristupna mreža



Institucije, ustanove,...

- Ethernet: 100Mb/s, 1Gb/s, 10Gb/s
- WiFi: 11Mb/s, 54Mb/s, 240Mb/s
- Danas se krajnji sistemi tipično povezuju na Ethernet *switch* ili WLAN *Access Point*
- DMZ (*DeMilitarized Zone*)
- Tronivovska hijerarhijska mreža

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)



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>

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

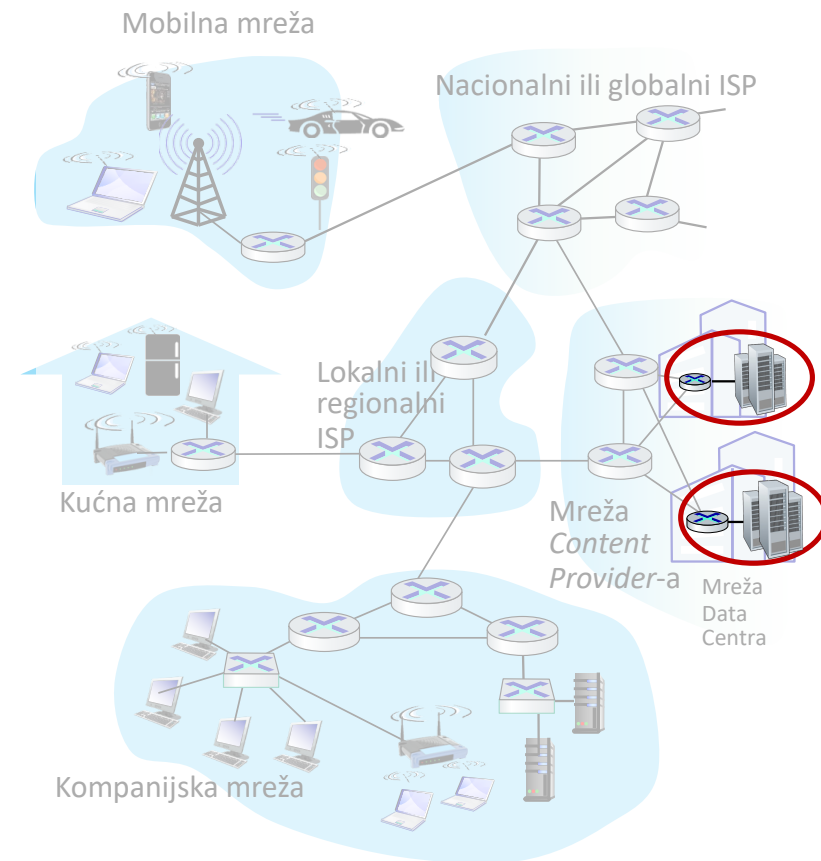
Uvod u računarske mreže

Mreža Data Centra

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



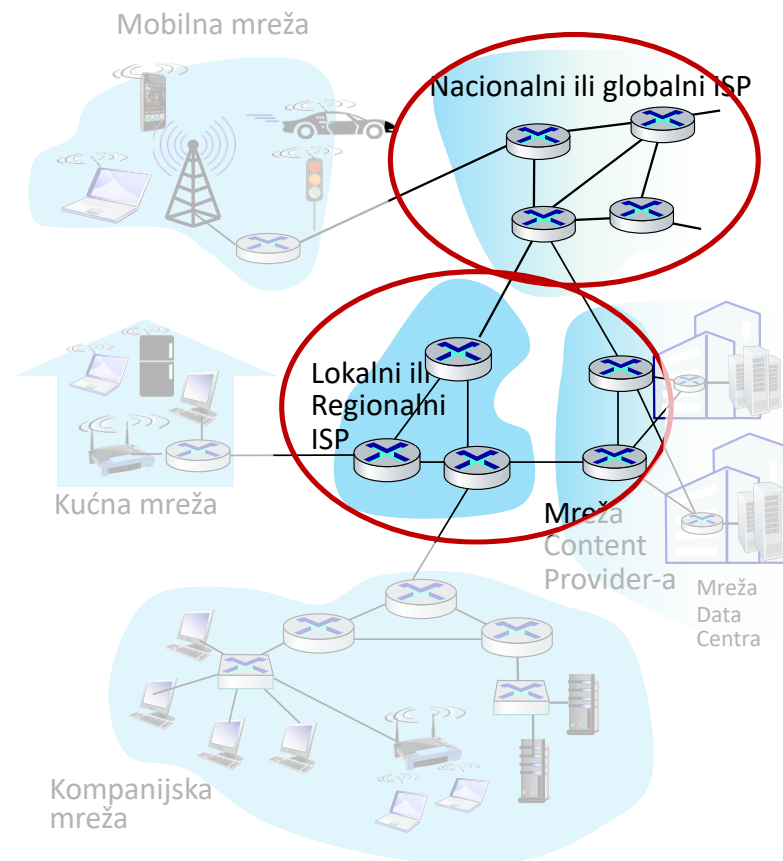
Massachusetts Green High Performance Computing Center (mghpcc.org)



Uvod u računarske mreže

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



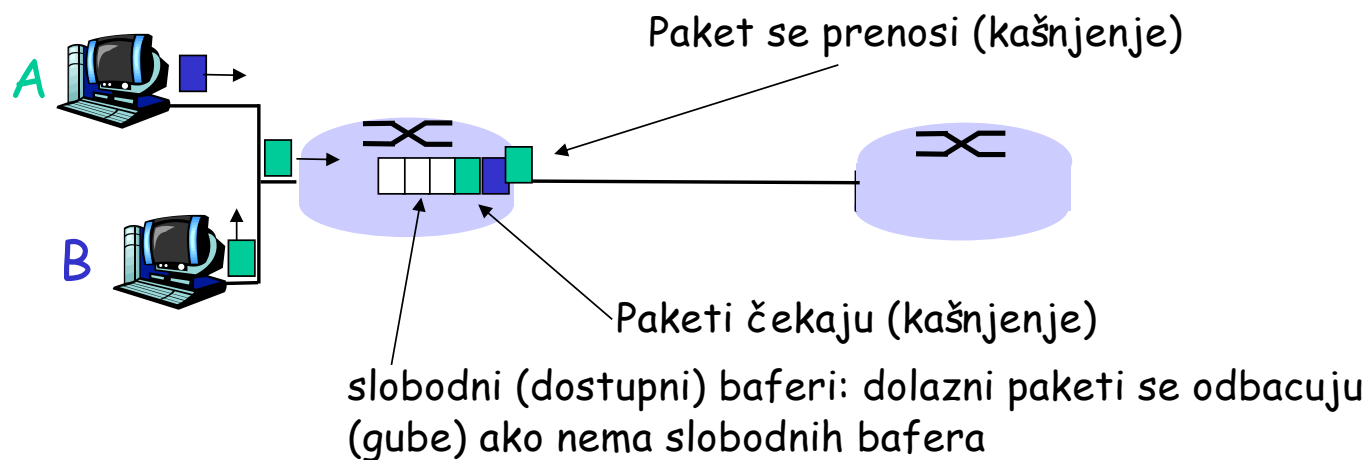
Performanse računarskih mreža (ponavljanje)

- ❑ Kašnjenje
- ❑ Gubici
- ❑ Propusnost

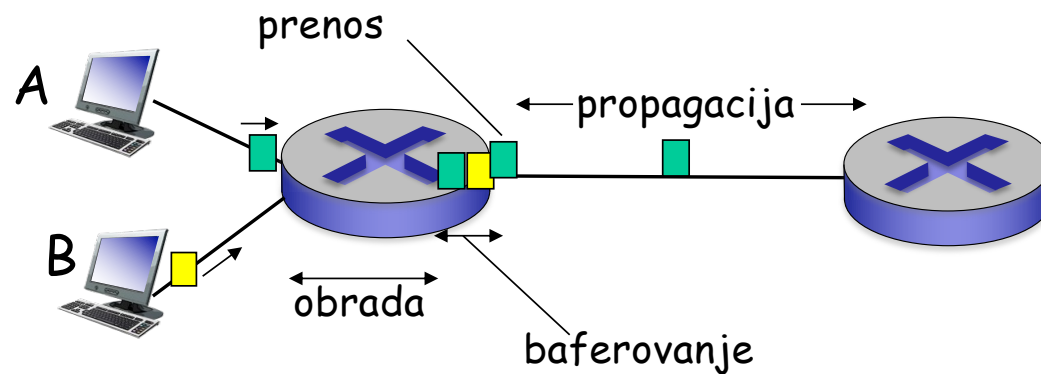
Kako nastaju gubici i kašnjenje?

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.



Četiri izvora kašnjenja paketa



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

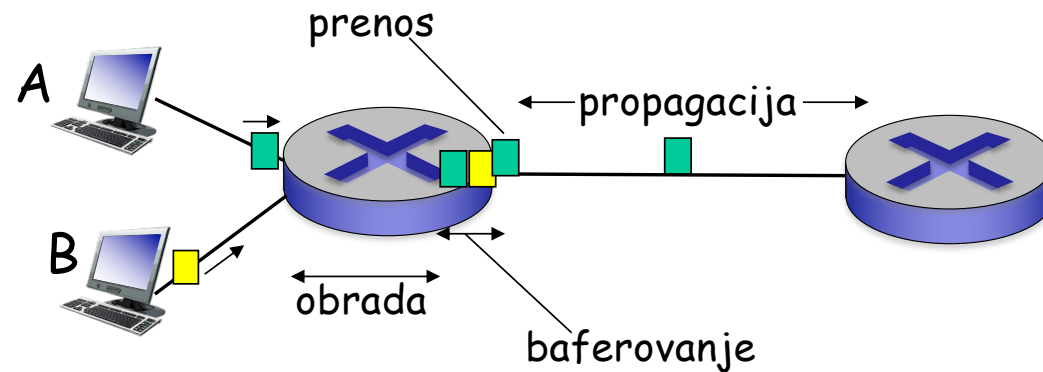
d_{obrada} : obrada paketa

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

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

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

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

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

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

$$d_{\text{propagacije}} = d/s$$

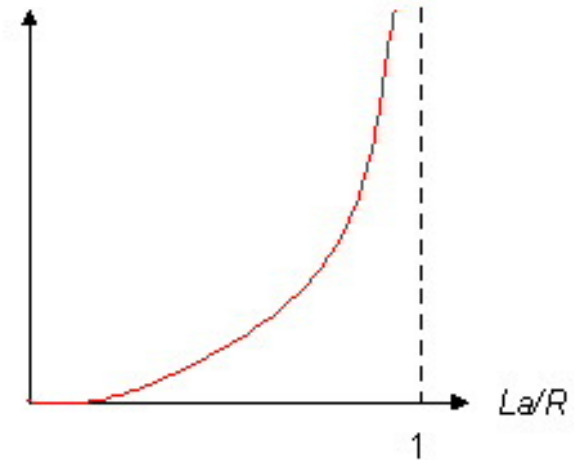
Kašnjenje usled čekanja u baferu

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

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

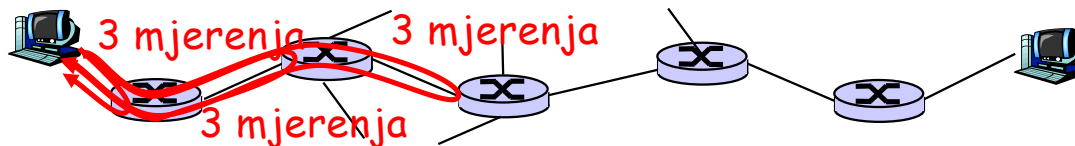
- $La/R \sim 0$: srednje kašnjenje uslijed čekanja je malo
- $La/R \rightarrow 1$: kašnjenje postaje veliko
- $La/R > 1$: više saobraćaja "dolazi" nego što može da "ode", srednje kašnjenje je beskonačno!

Srednje kašnjenje
uslijed čekanja



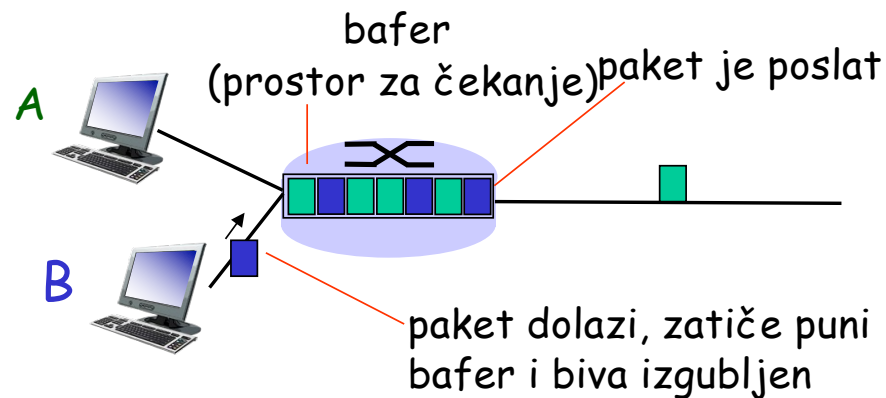
“Realna” Internet kašnjenja i rute

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



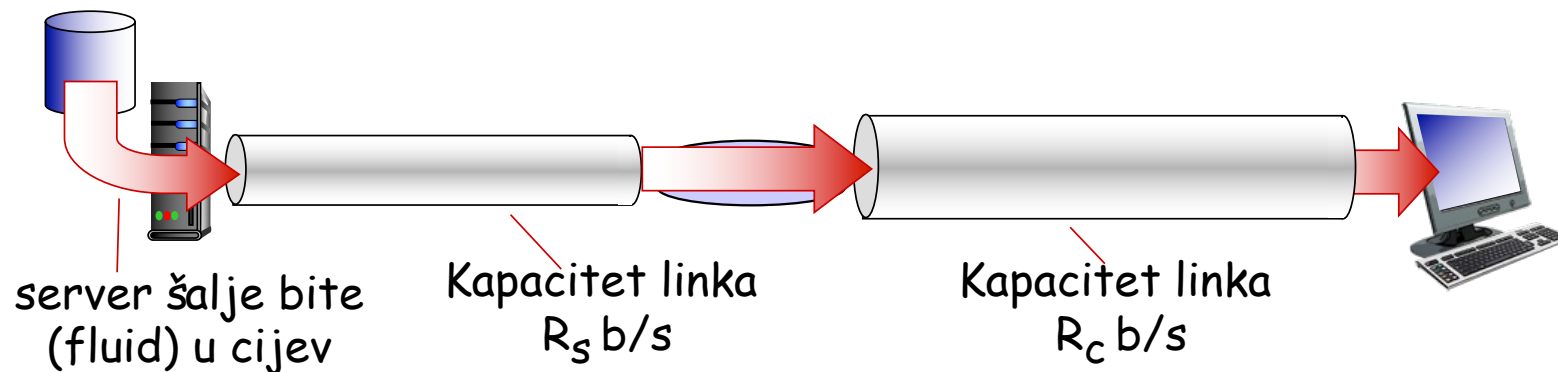
Gubitak paketa

- ❑ 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}



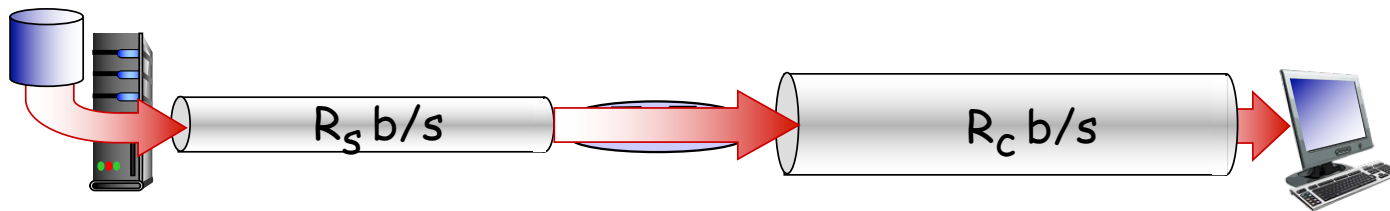
Propusnost

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

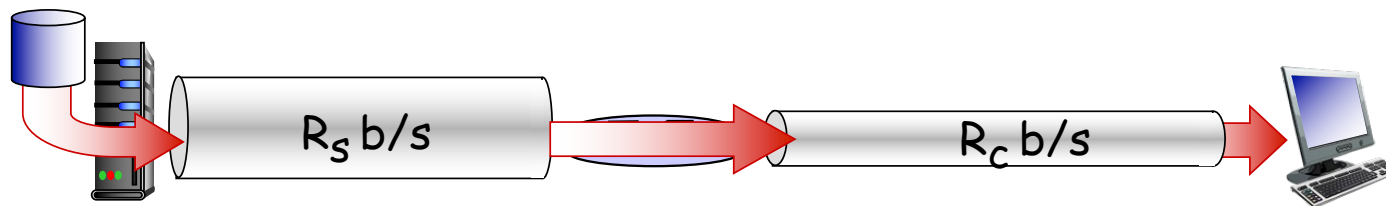


Propusnost (više)

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?

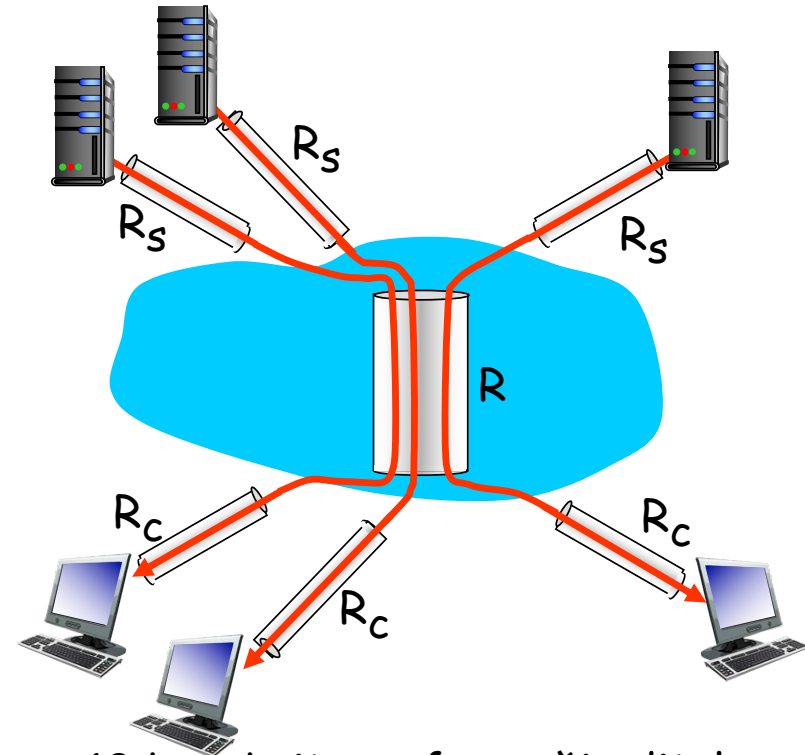


"bottleneck" link

link koji ograničava propusnost

Propusnost: Internet scenario

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

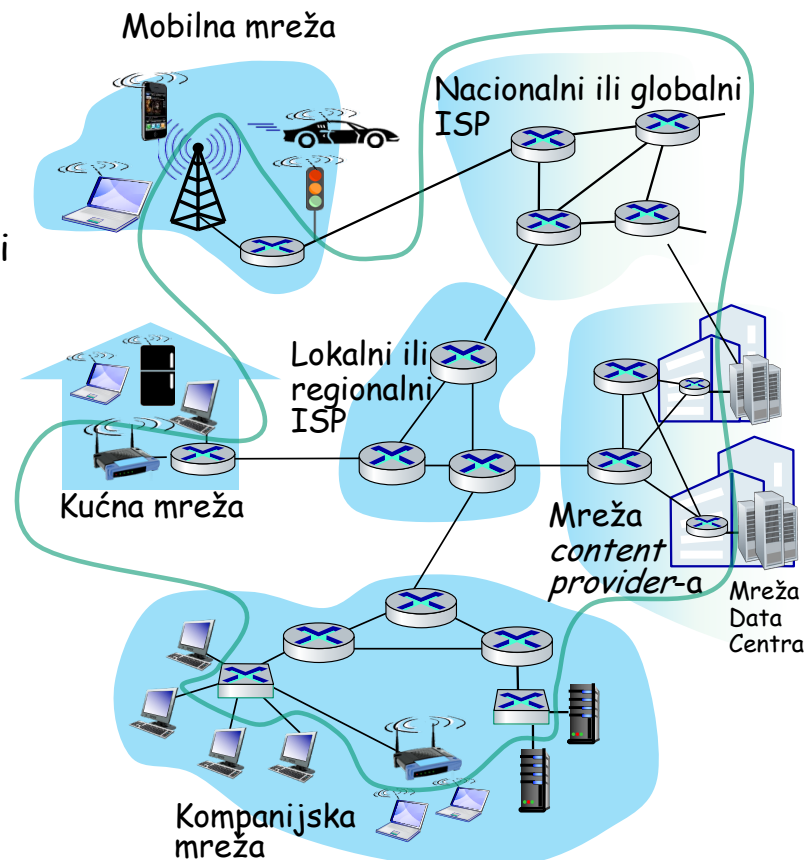


10 konekcija na fer način dijele
"bottleneck" link okosnice
kapaciteta R b/s

Uvod u računarske mreže

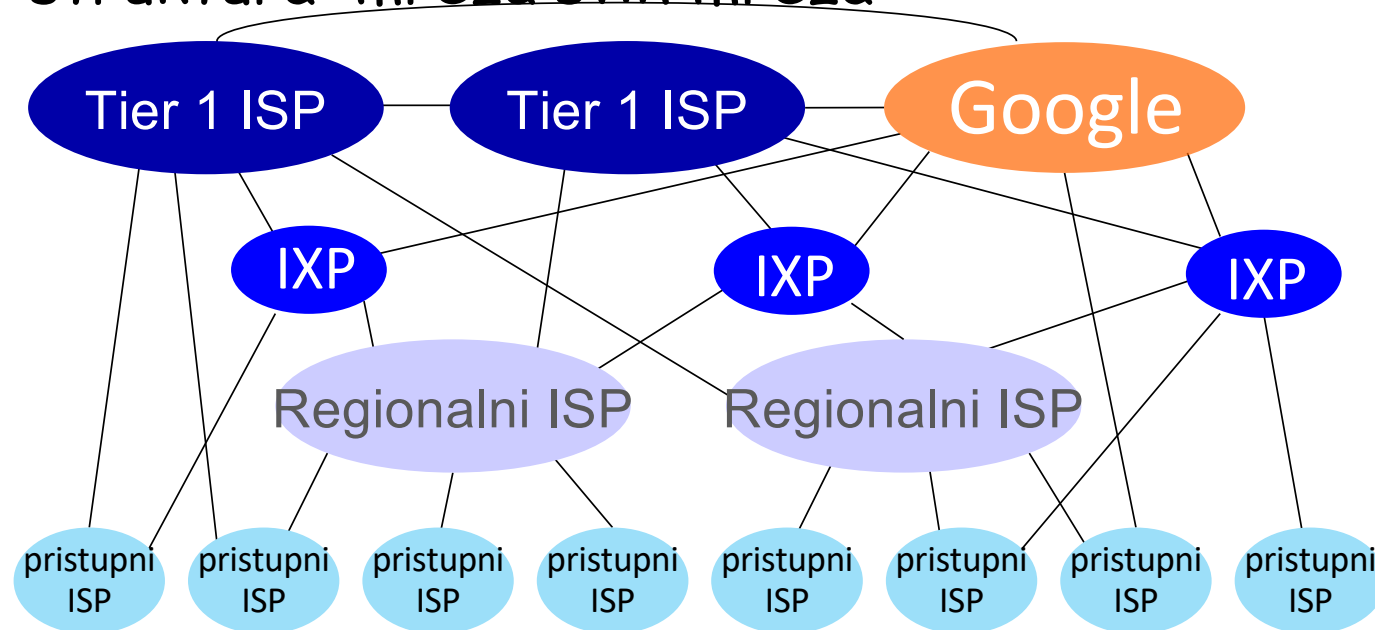
Internet struktura: mreža svih mreža

- ❑ 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

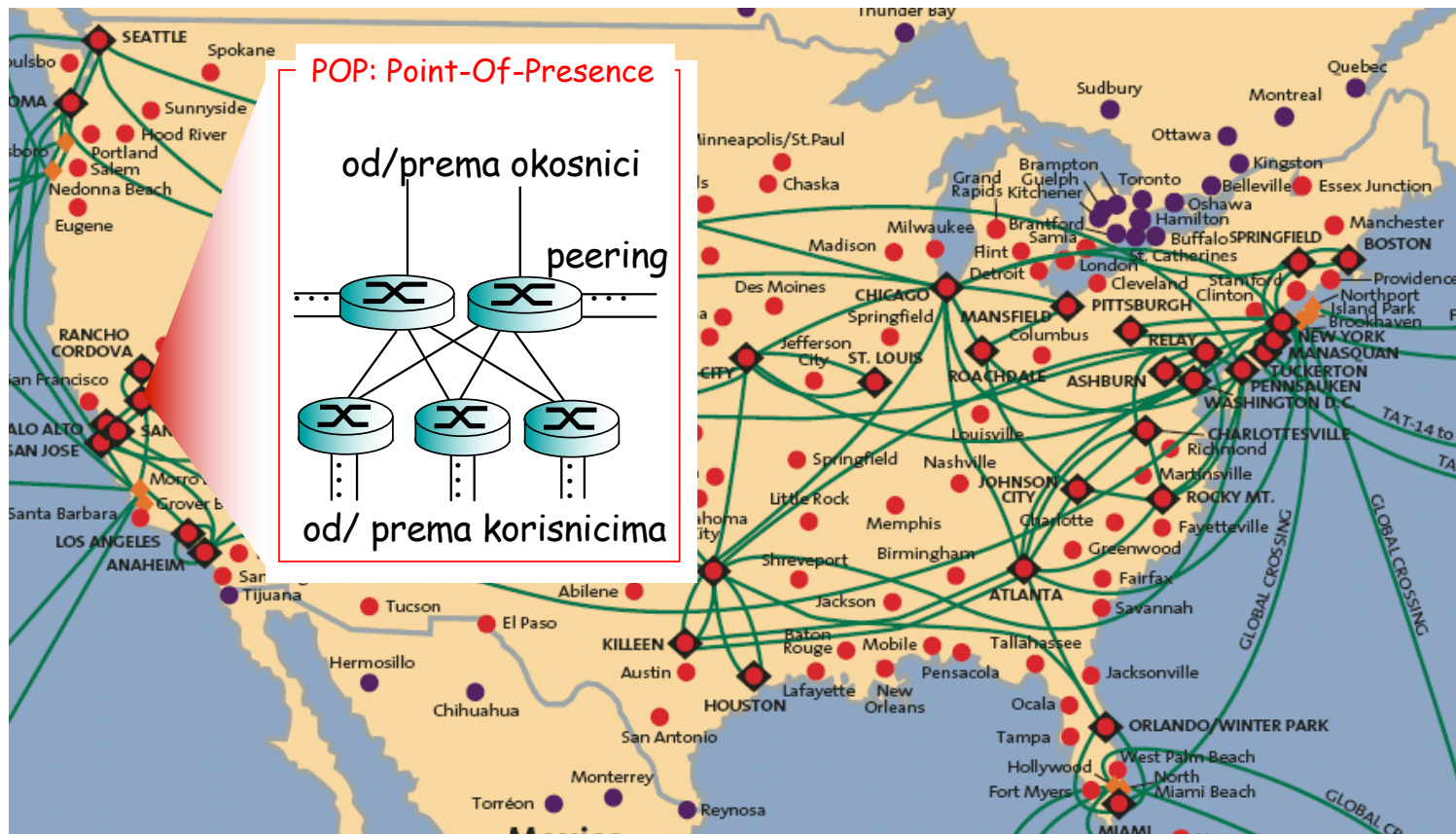
Internet struktura: mreža svih mreža



- 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

Tier-1 ISP: npr. Sprint



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

Malware

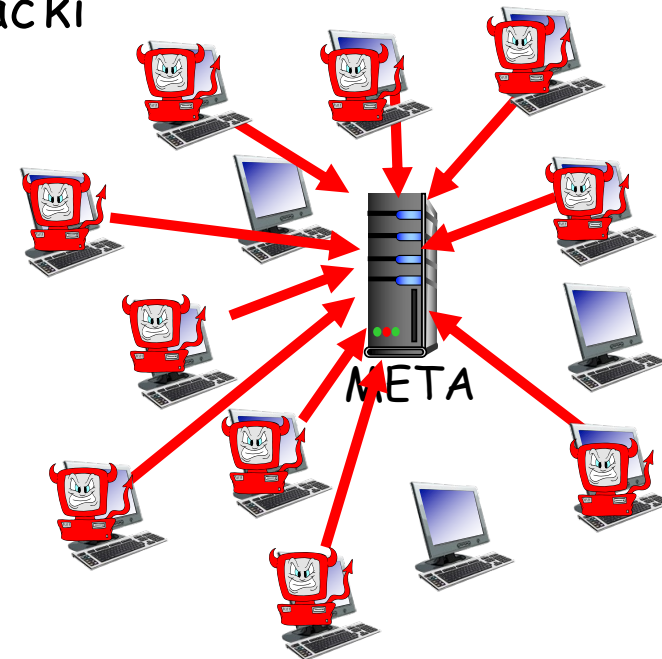
- ❑ Može sa Interneta dospjeti u host pomoću:
 - *virusa*: samo-replicirajuća "zaraza" prijemom/izvršavanjem programa (npr. *e-mail attachment*)
 - *worm*: samo-replicirajuća "zaraza" pasivnim prijemom objekta koji se samoizvršava
- ❑ *Spyware malware* može
 - evidentirati unos sa tastature,
 - evidentirati 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

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

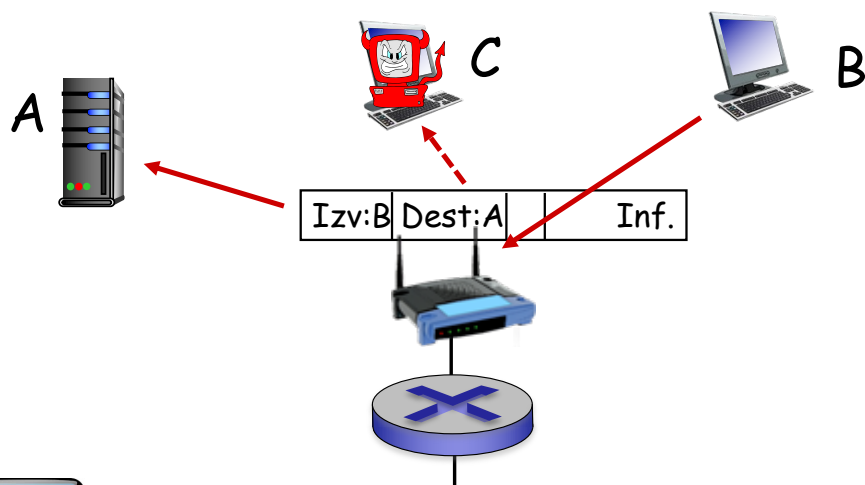
1. Izbor mete
2. Upad u hostove oko mete (botnet)
3. Slanje velikog broja paketa meti od strane kompromitovanih hostova



Uvod u računarske mreže

Packet “sniffing”:

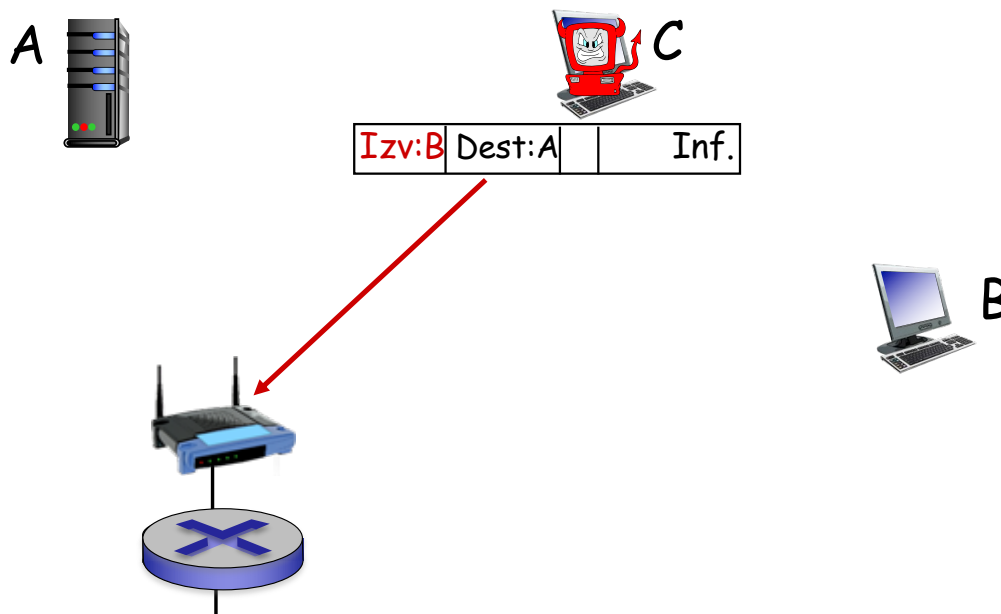
- Zajednički medijum za prenos (dijeljeni Ethernet, WiFi)
- Promiskuitetni mrežni interfejs analizira sve pakete koji se prenose



Wireshark software je primjer bezplatnog *packet sniffer* programa

Uvod u računarske mreže

IP spoofing: slanje paketa sa netačnom izvorišnom adresom



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