Računarske mreže

(Studijski program: Telekomunikacije)

Prof.dr Igor Radusinović

igorr@ac.me

Doc. 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:

	broj	% ocjene	raspodjela bodova
Kolokvijum	1	50%	(30t, 10z, 10l)
Završni ispit	1	50%	(30t, 10z, 10l)

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?
- Ivica 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

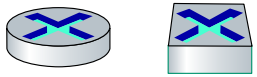
I. Uvod u Python programiranje,
II. Socket programming,
III. Mininet
IV. Konfiguracija switcha
V. Konfiguracija routera

Uvod u računarske mreže

Šta je Internet?

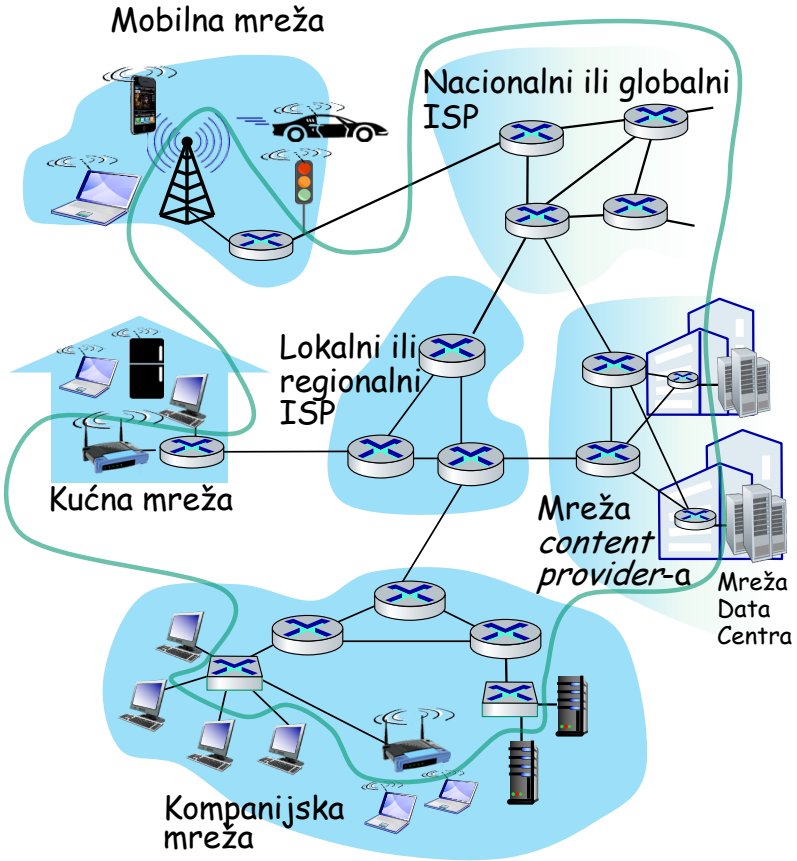
- Milijarde povezanih uređaja:
  - *Host* = *krajnji sistem*
  - Izvršava *mrežne aplikacije*

- *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

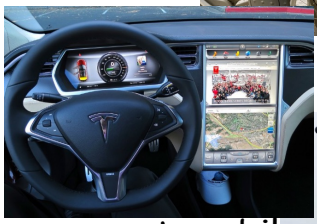
Internet frižider

IP okvir za slike

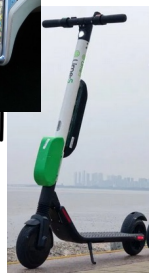
Pacemaker i monitor

Strujomjer

bicikla



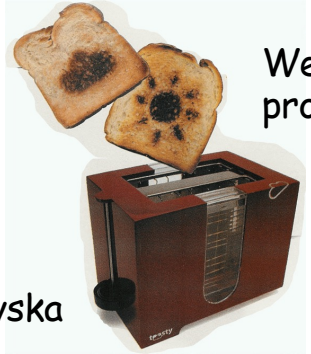
automobil



skuter

Sigurnosna kamera

Slingbox: daljinski kontrolisana kablovska TV



Web taster + prognoza vremena

AR uređaji

Internet telefoni

Konzole za igru

senzori

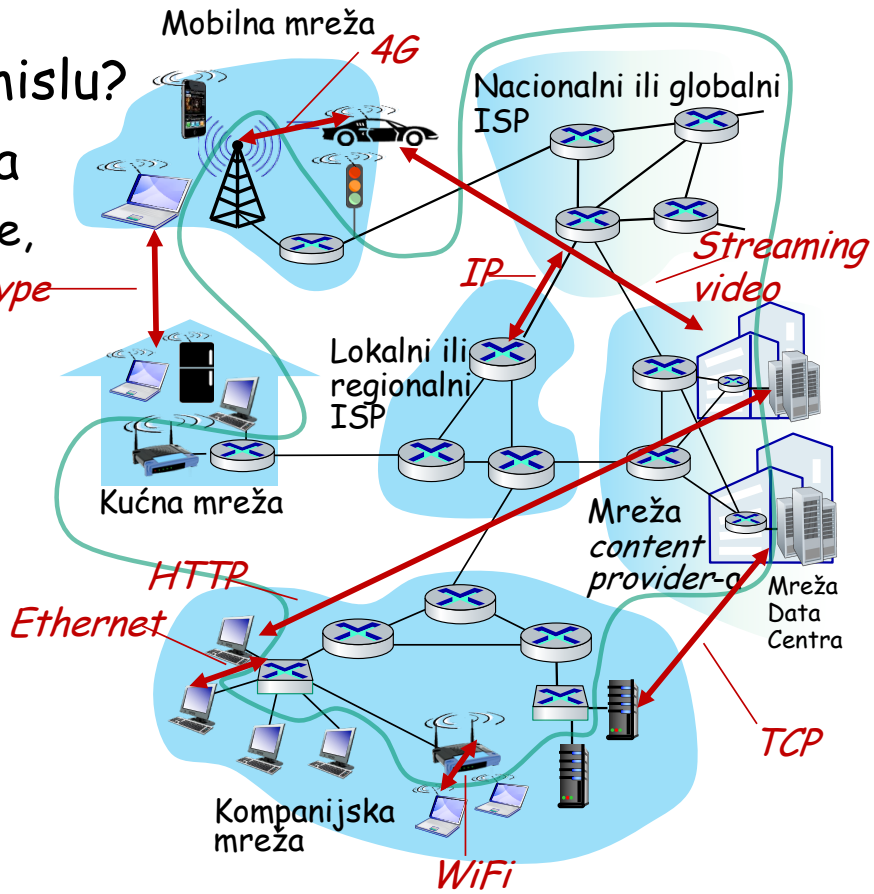
Fitbit

Drugi?

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*

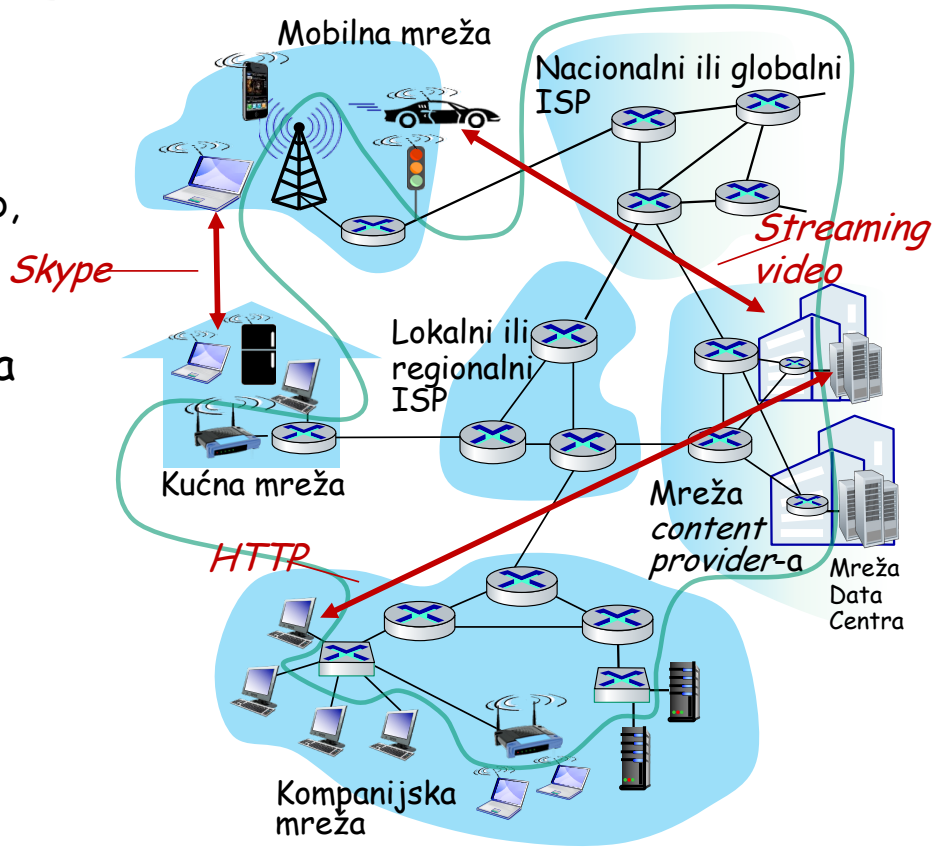


Uvod u računarske mreže

Šta je Internet sa stanovišta usluge?

Komunikaciona infrastruktura koja omogućava

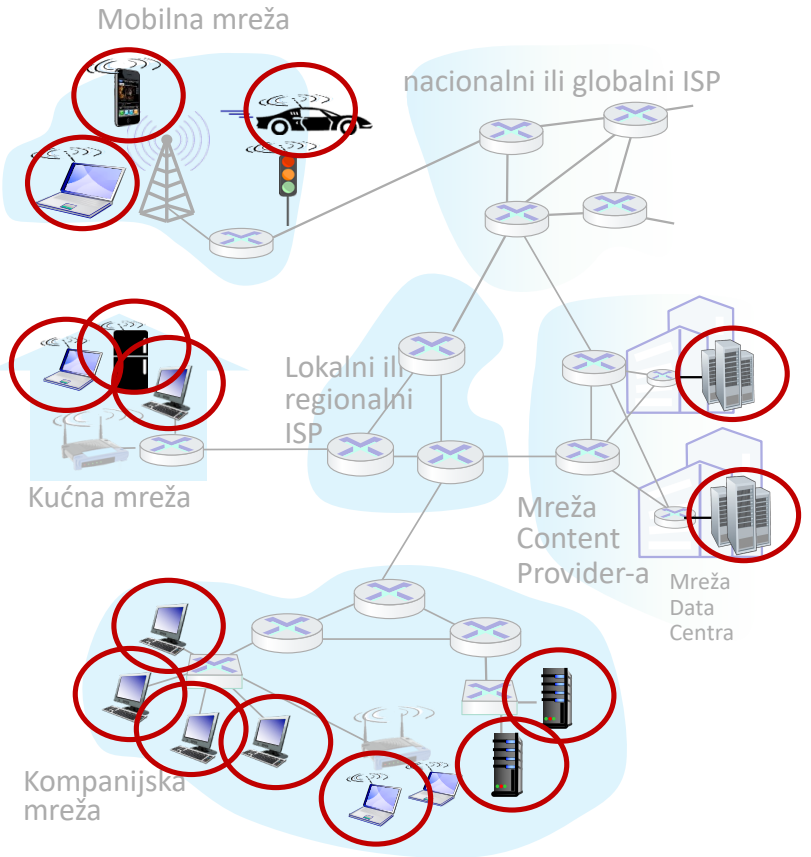
- komunikaciju između distribuiranih aplikacija (Web, email, igrice, e-commerce, baze podataka, društvene mreže, file sharing,…)
- pragramabilni interfejs do distribuiranih aplikacija
  - Aplikacije šalju i primaju podatke preko Interneta
  - Omogućava opcije servisa, analogne poštanskom servisu



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

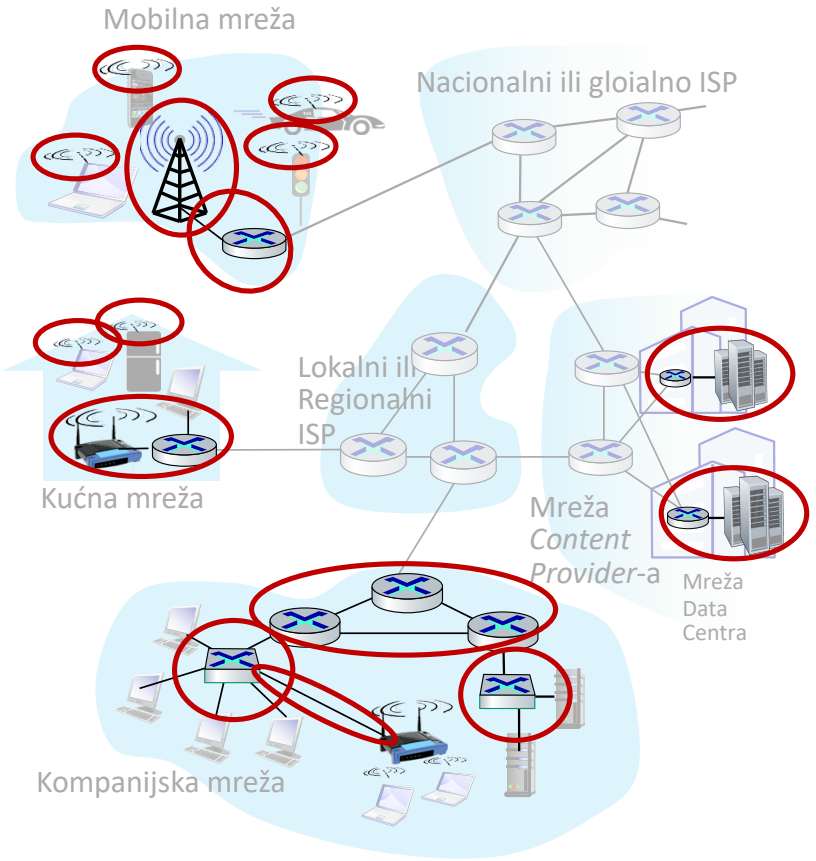
- Rezidencijalne pristupne mreže
- Institucionalne pristupne mreže (ustanove, kompanije)
- Bežične pristupne mreže (WiFi, 4G/5G)

Važno je obratiti pažnju na

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

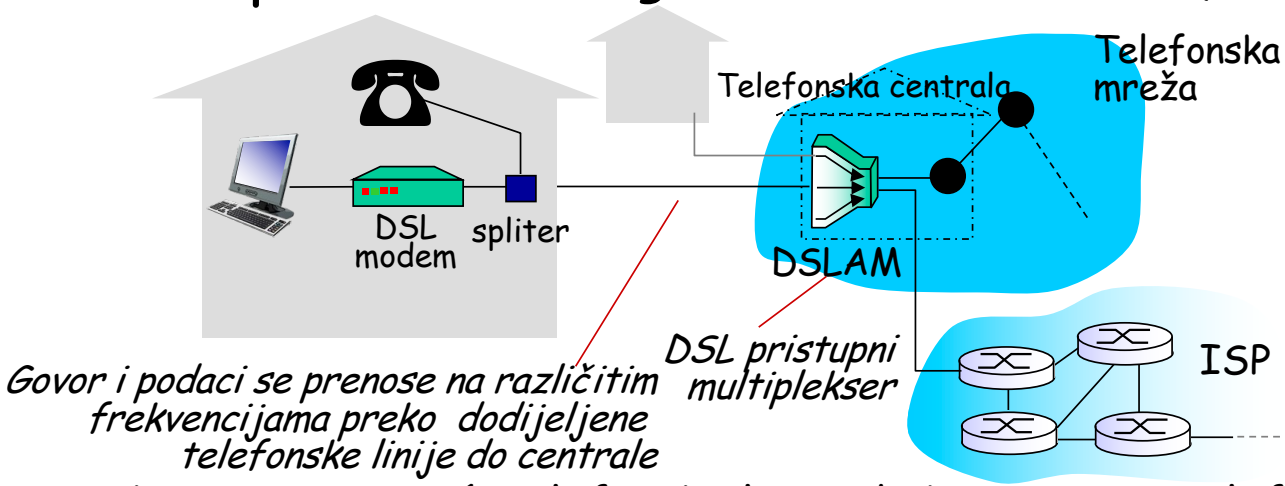
Popularni pristupi

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



Uvod u računarske mreže

Pristupna mreža: D*igital Subscriber Line* (DSL)

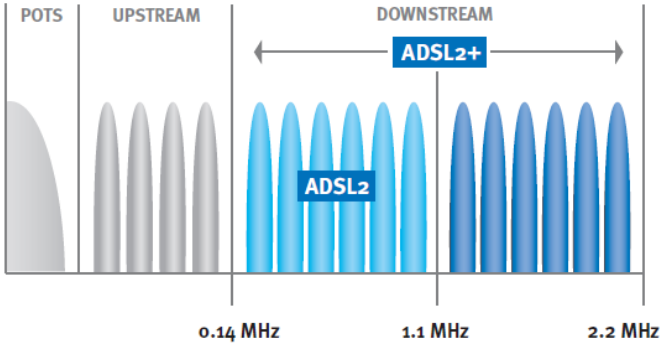


- koristi *postojeću* telefonsku liniju do DSLAM-a u telefonskoj centrali
  - Podaci se preko DSL linije prenose do Interneta
  - Govor se preko DSL linije prenosi do telefonske mreže
- < 100 Mb/s brzina prenosa na upstream-u (tipično < nekoliko Mb/s)
- < 300 Mb/s brzina prenosa na downstream-u (tipično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

Uvod u računarske mreže

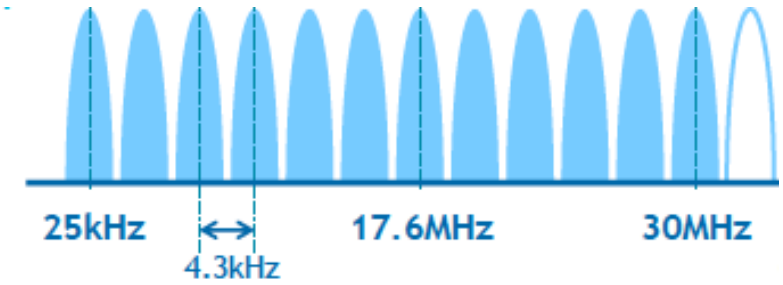
ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)

- 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



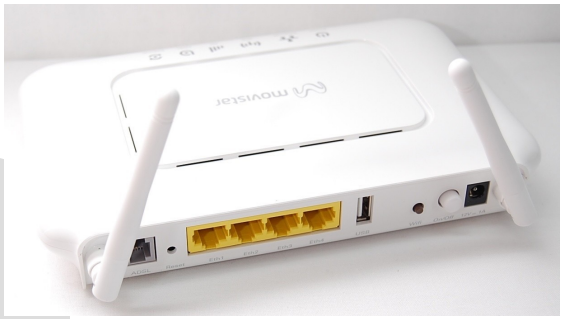
Uvod u računarske mreže

- 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

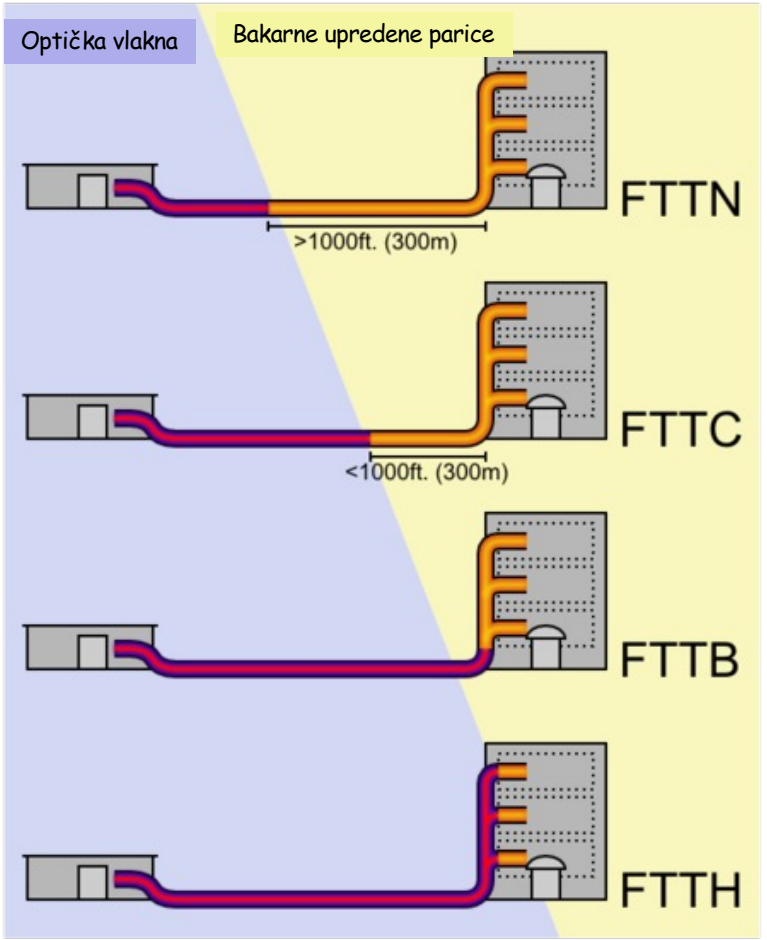
Pristupna mreža: Kućna mreža



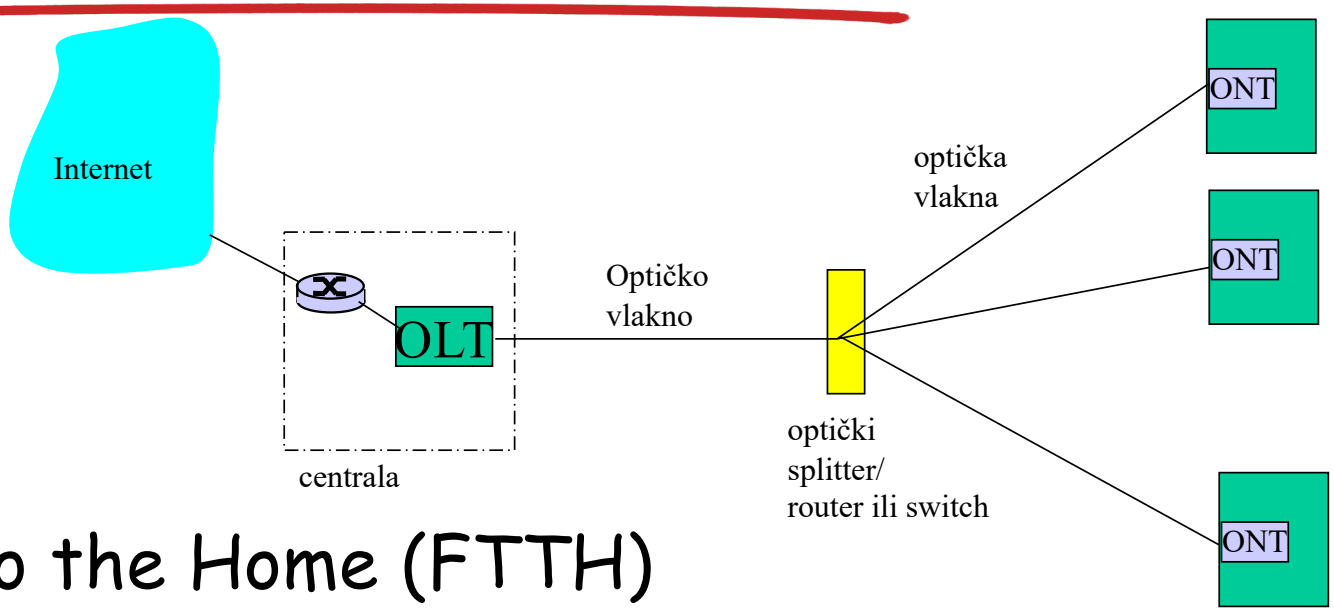
Uvod u računarske mreže

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

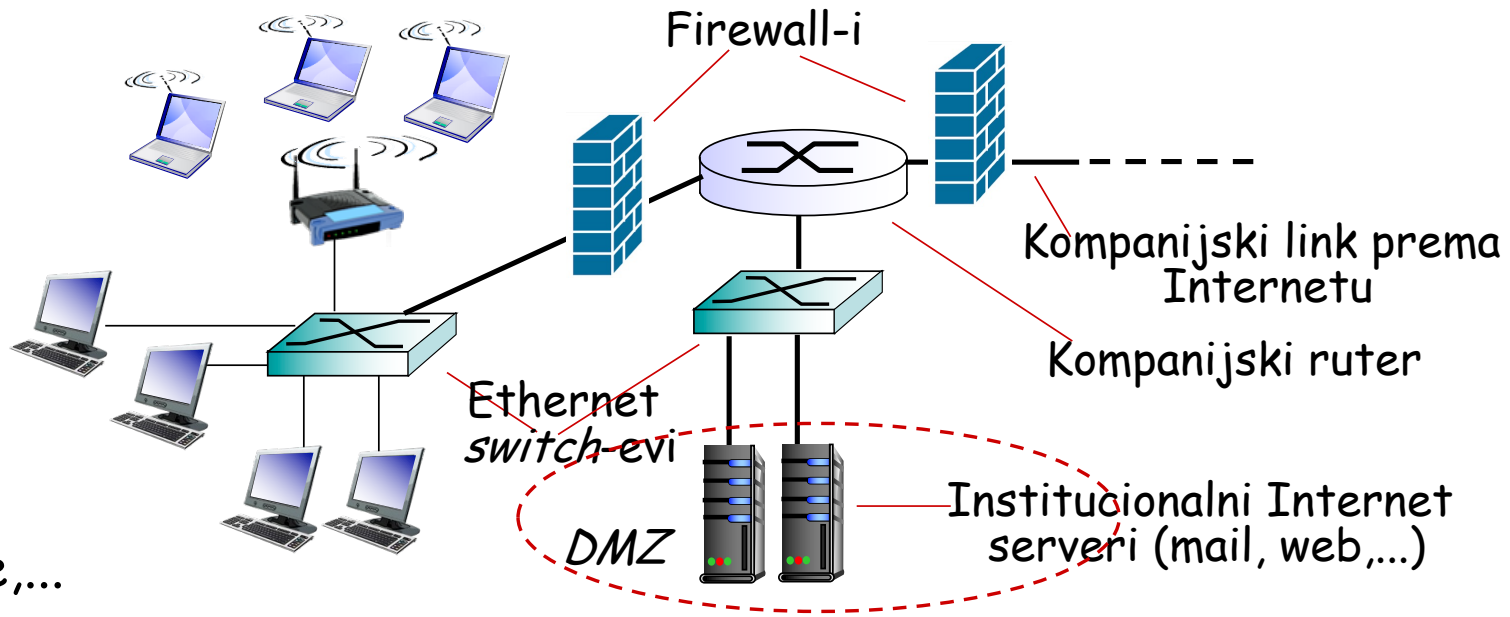


Fiber to the Home (FTTH)

- 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

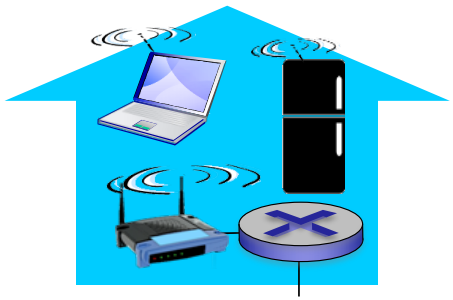
Uvod u računarske mreže

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

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

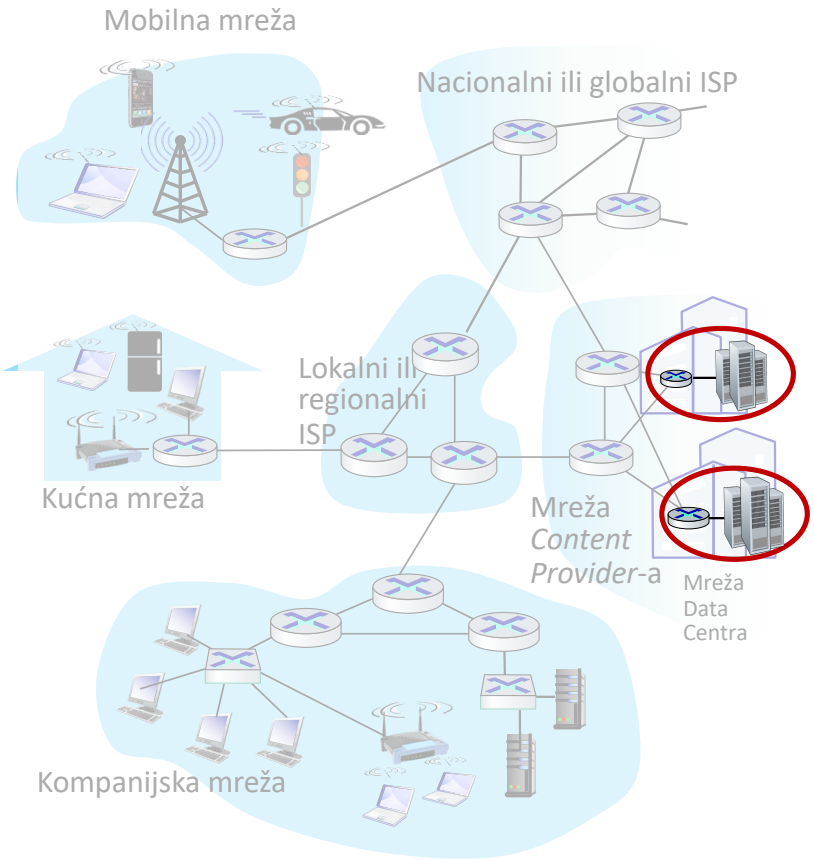
https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/catalyst-9100ax-access-points/nb-06-cat-9130-ser-ap-ds-cte-en.html

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

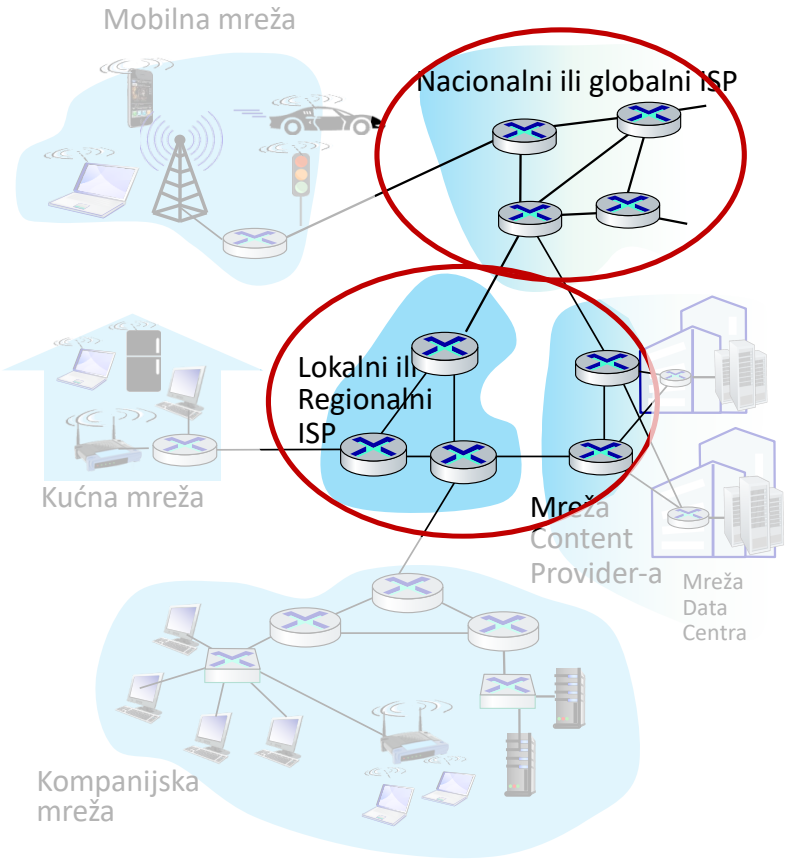
Massachusetts Green High Performance Computing Center (mghpcc.org)



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



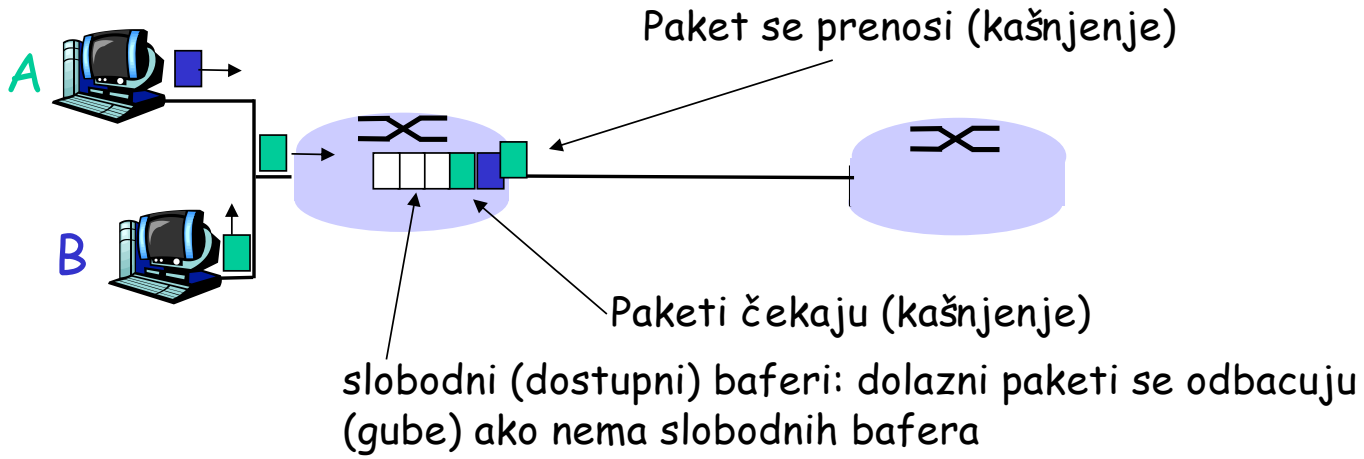
Performanse računarskih mreža (ponavljanje)

- Kašnjenje
- Gubici
- Propusnost

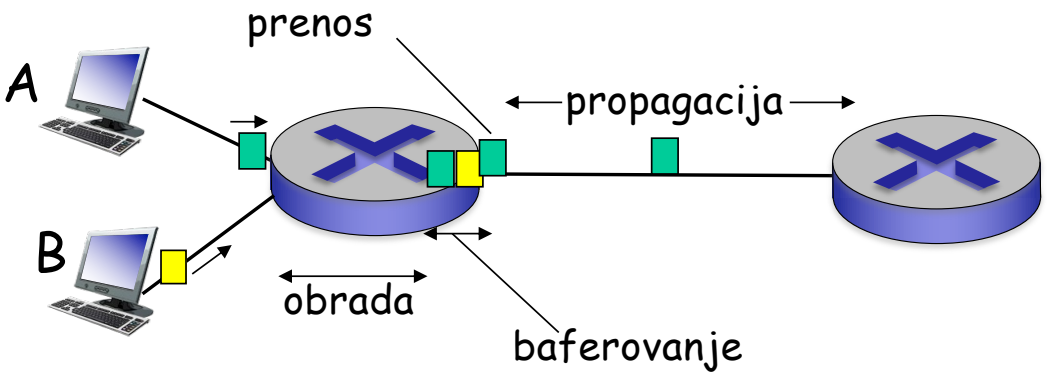
Kako nastaju gubici i kašnjenje?

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



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

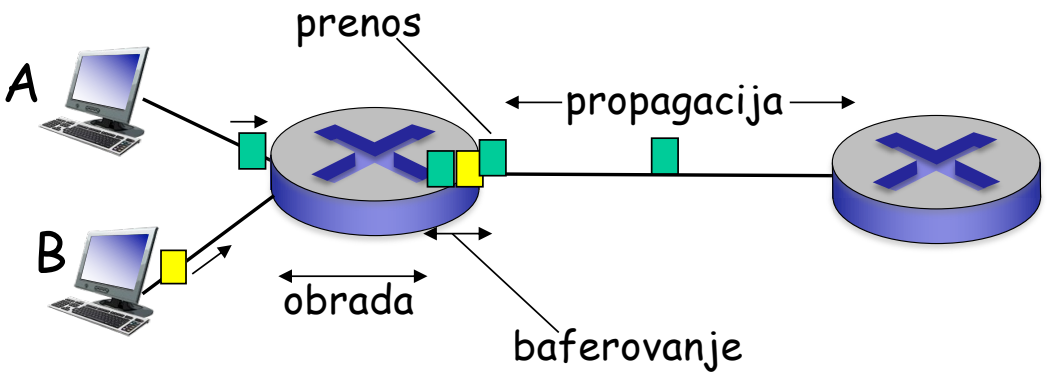
d_{obrada}: obrada paketa

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

$d_{baferovanje}$: čekanje u baferu

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

Četiri izvora kašnjenja paketa



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

$d_{prenosa}$: kašnjenje uslijed prenosa:
- L: veličina paketa (b)
- R: kapacitet linka *(b/s)*
- $d_{prenosa} = L/R$ ←

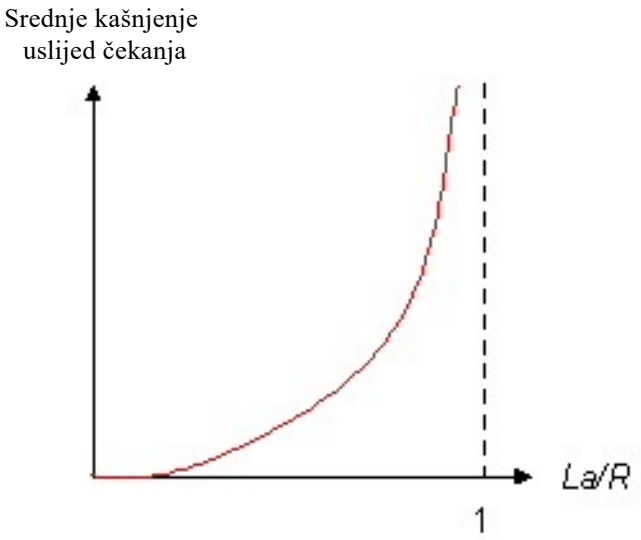
$d_{prenosa}$ i $d_{propagacije}$ *se veoma razlikuju*

$d_{propagacije}$: kašnjenje uslijed propagacije:
- d: dužina linka
- s: brzina svjetlosti (~$2x10^8$ m/s)
- → $d_{propagacije} = d/s$

Kašnjenje usled čekanja u baferu

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

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



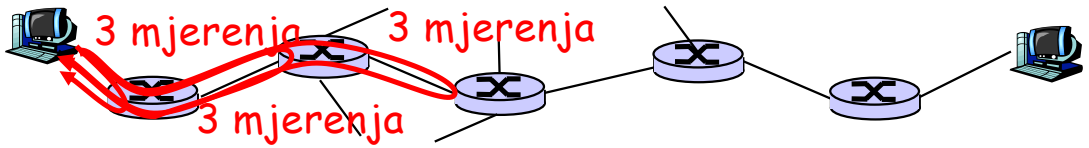
- La/R ~ 0: srednje kašnjenje uslijed čekanja je malo
- La/R -> 1: kašnjenje postaje veliko
- La/R > 1: više saobraćaja "dolazi" nego što može da "ode", srednje kašnjenje je beskonačno!


La/R ~ 0


La/R -> 1

"Realna" Internet kašnjenja i rute

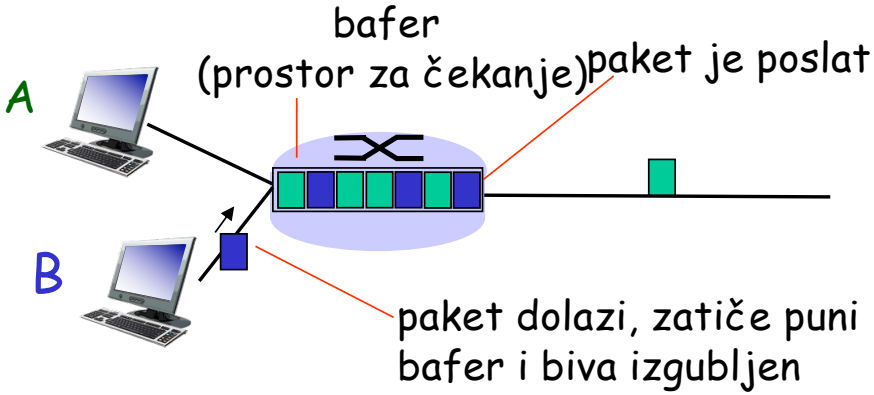
- Kako izgledaju "realna" Internet kašnjenja & gubici?
- **Traceroute**: daje mjerenja kašnjenja od izvora do rutera duž Internet puta (od izvora do destinacije i nazad). Za svako *i:*
  - šalje tri paketa koji će dostići ruter *i* na putu do destinacije
  - ruter *i* će vratiti paket pošiljaocu
  -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



www.traceroute.org

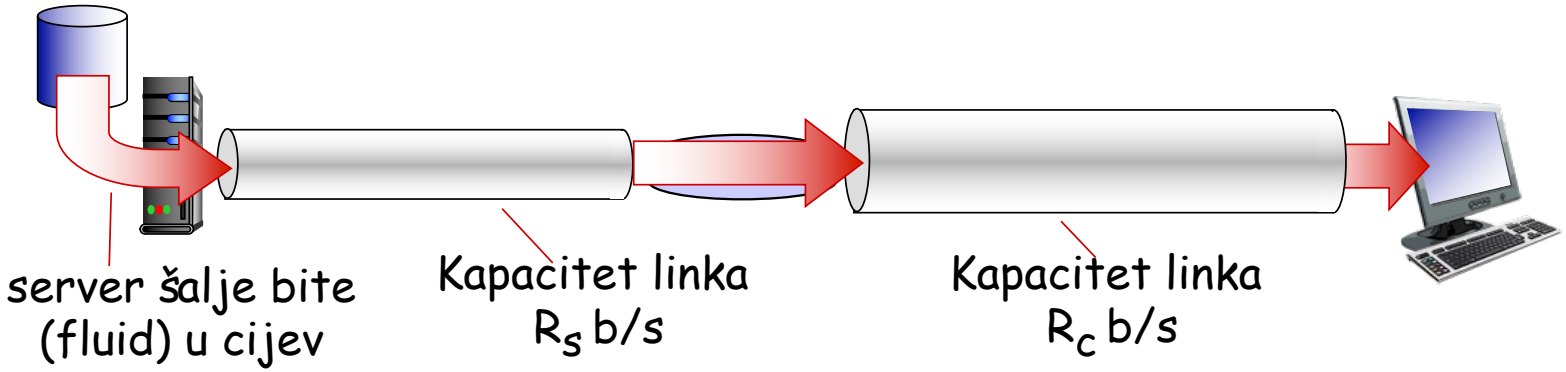
Gubitak paketa

- 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}



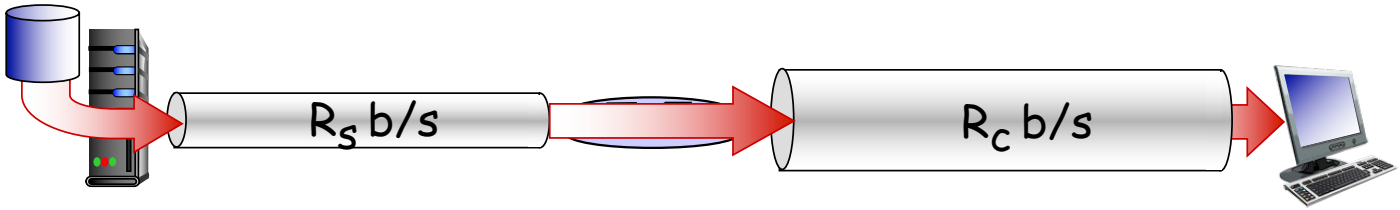
Propusnost

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

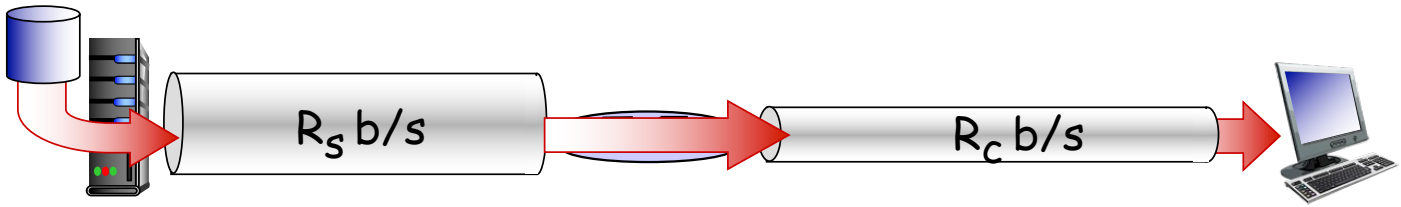


Propusnost (više)

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?

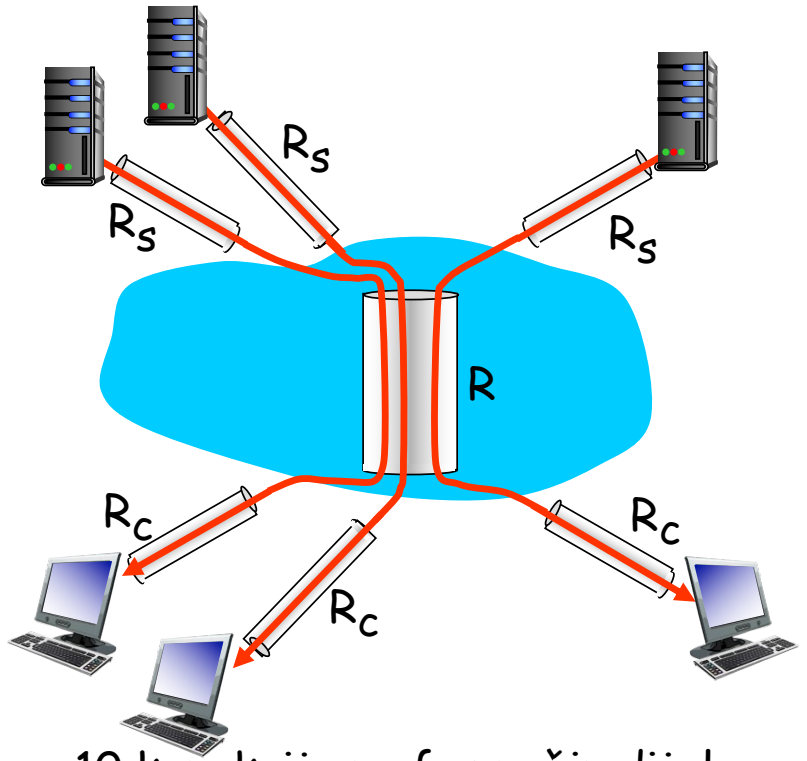


"bottleneck" link

link koji ograničava propusnost

Propusnost: Internet scenario

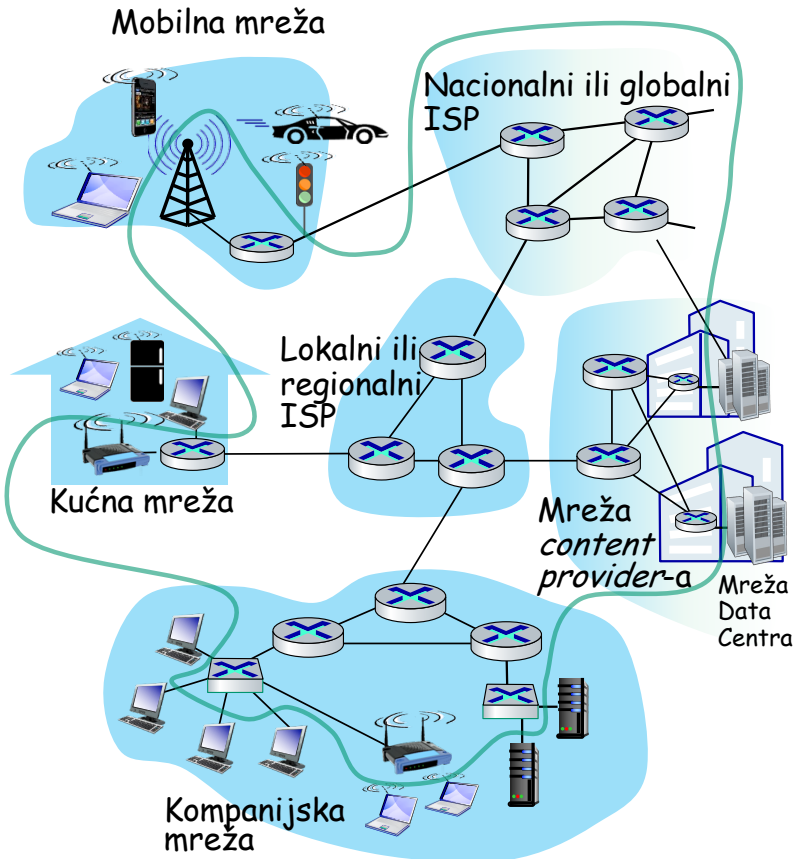
- Propusnost po konekciji: min(R_c,R_s,R/10)
- U praksi: R_c ili R_s je obično "bottleneck"



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

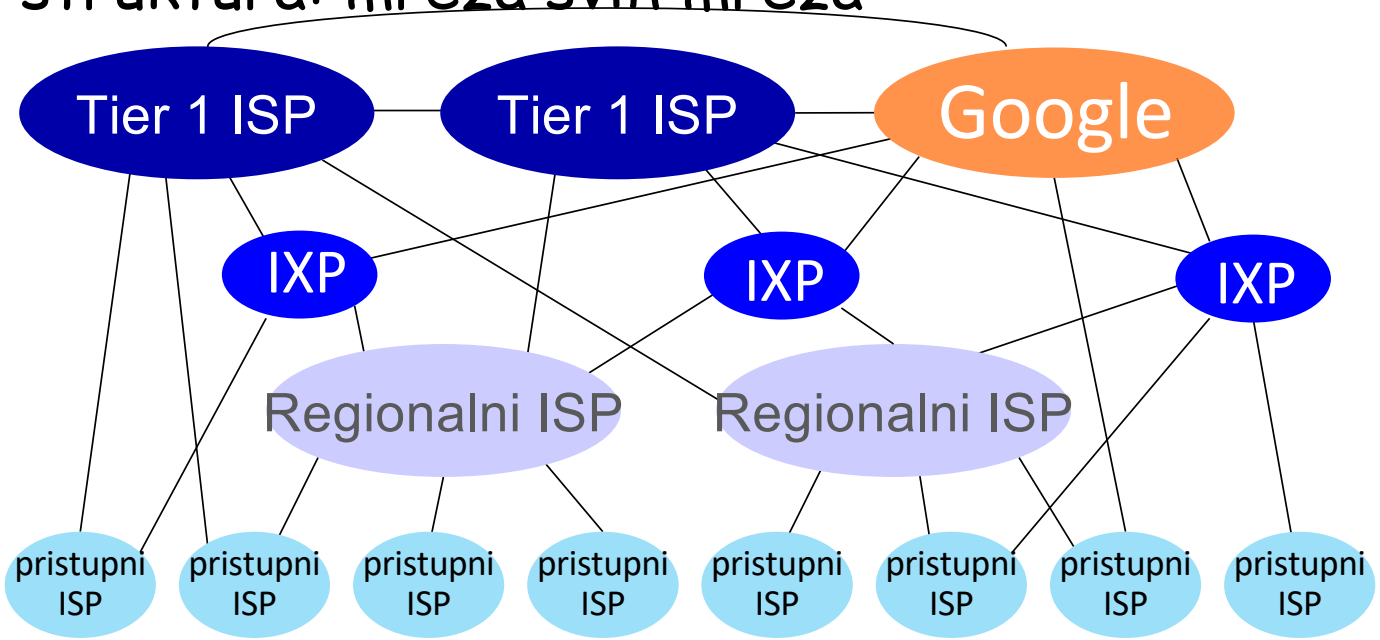
Internet struktura: mreža svih mreža

- 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

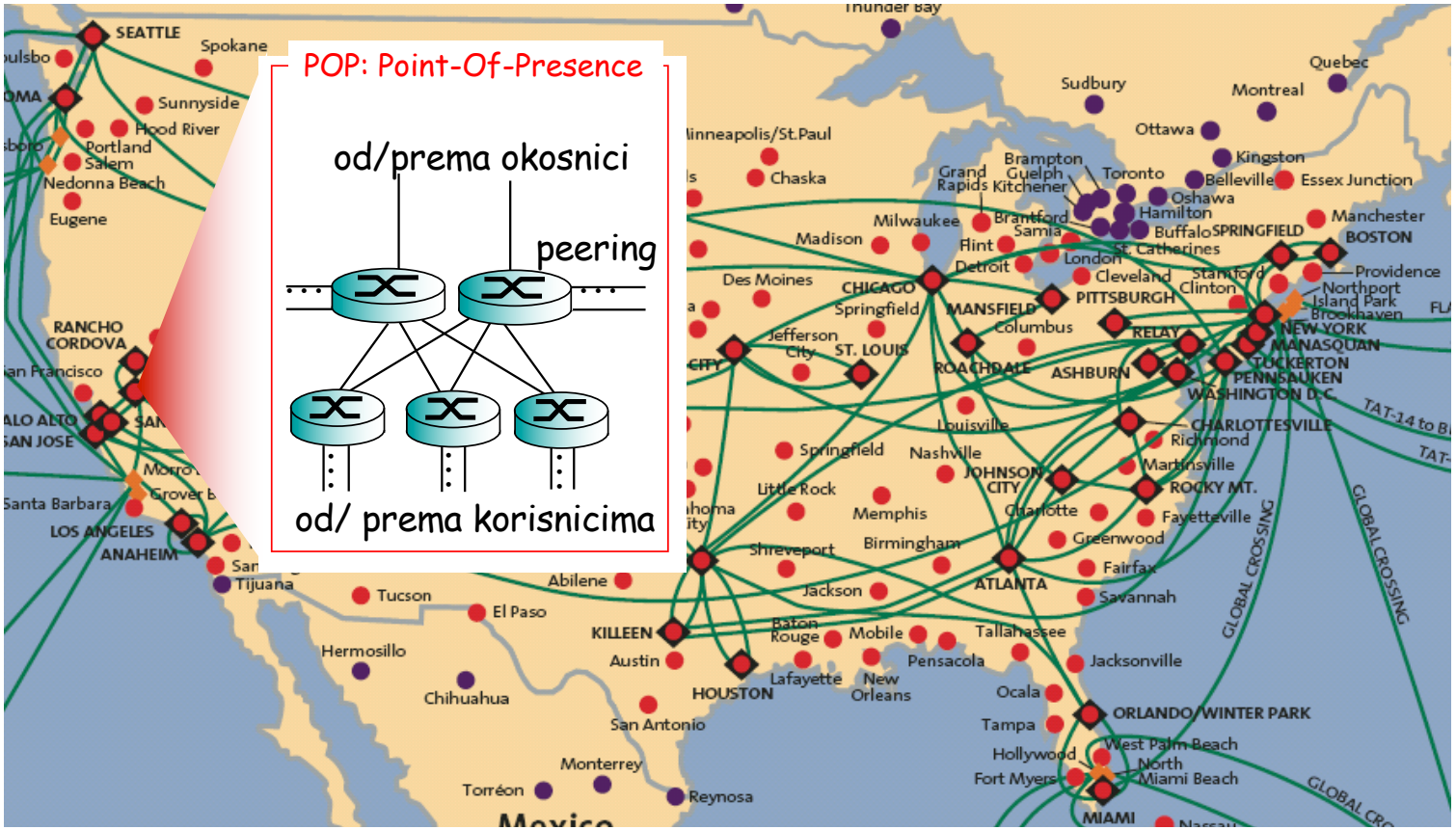
Internet struktura: mreža svih mreža



- 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

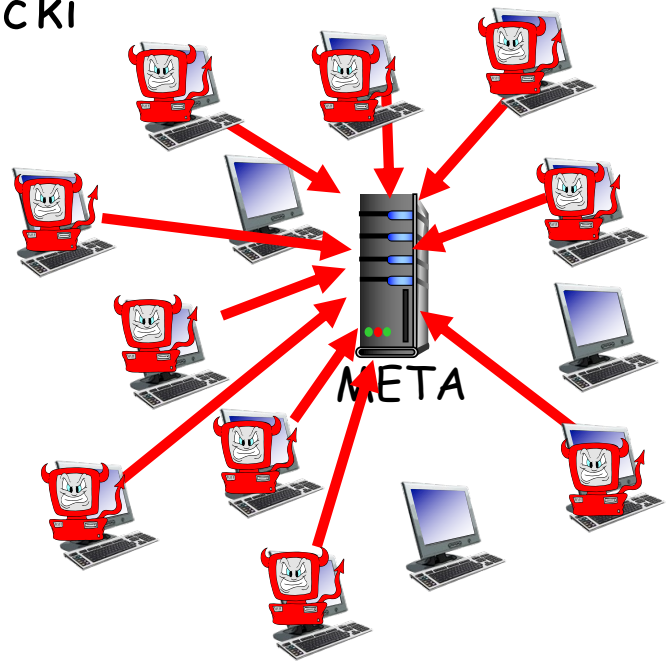
Malware

- 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

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

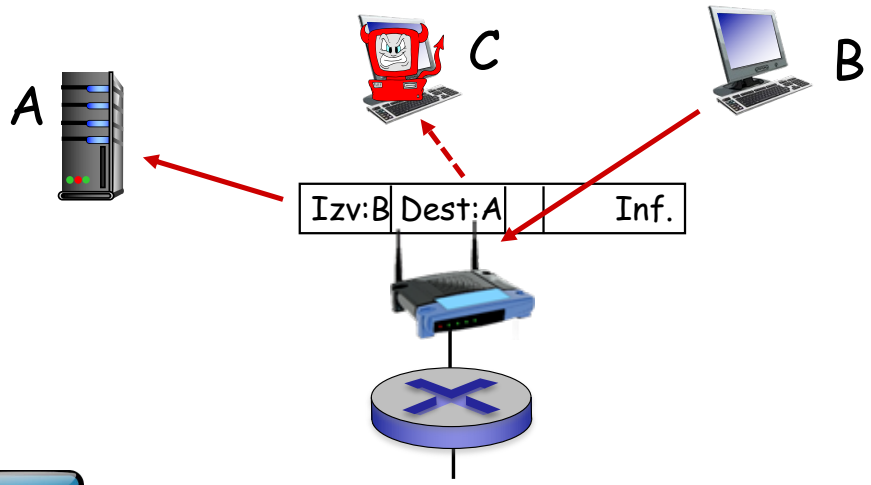
1. Izbor mete
2. Upad u hostove oko mete (botnet)
3. Slanje velikog broja paketa meti od strane kompromitovanih hostova



Uvod u računarske mreže

Packet "sniffing":

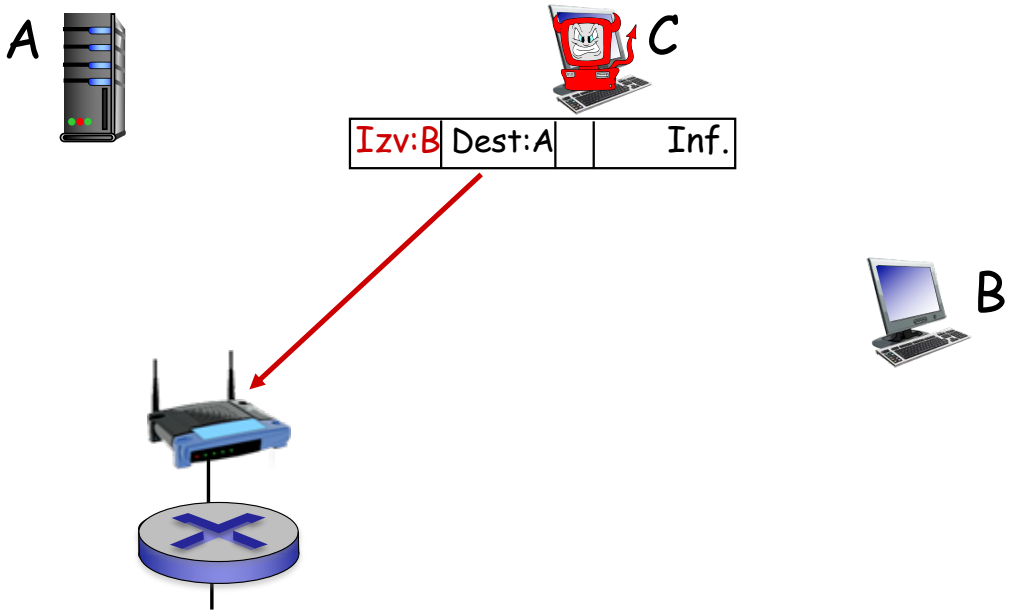
- Zajednički medijum za prenos (dijeljeni Ethernet, WiFi)
- Promiskuitetni mrežni interfejs analizira sve pakete koji se prenose



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