

Glava 6: Nivo linka

Ciljevi:

- ❑ Shvatanje principa servisa nivoa linka:
 - detekcija, korekcija greške
 - dijeljenje zajedničkog kanala višestrukim pristupom
 - adresiranje nivoa linka
 - pouzdani prenos podataka, kontrola protoka: *urađeno!*
 - LAN mreže: Ethernet, VLAN, WiFi, 4G
- ❑ Mreža datacentra
- ❑ Upoznavanje sa implementacijom različitih tehnologija nivoa linka

Nivo linka

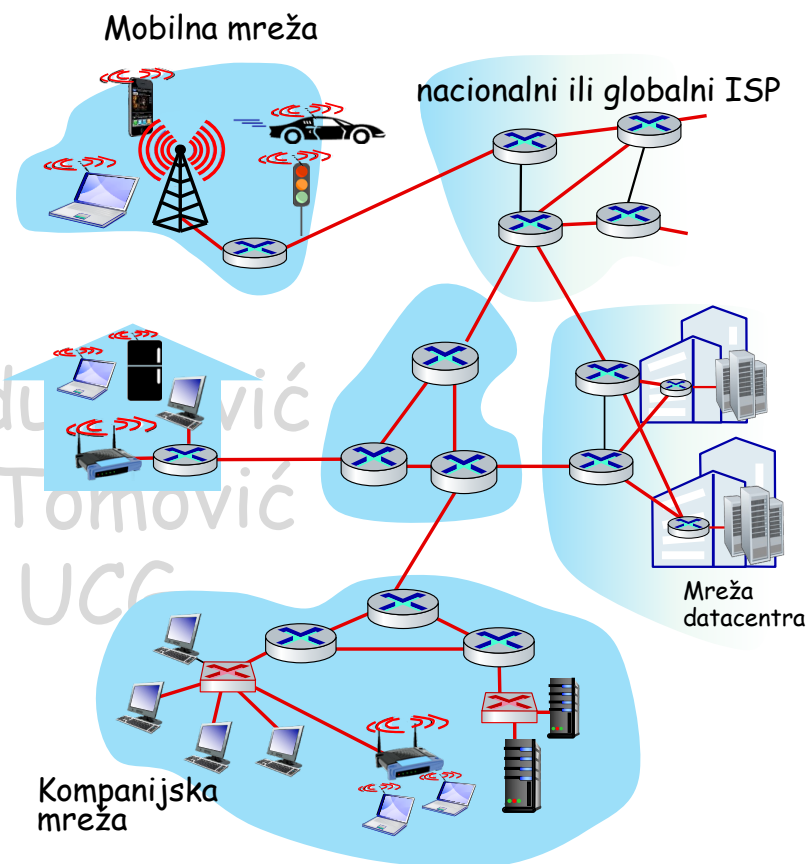
- ❑ Uvod, servisi
- ❑ Detekcija i korekcija greške
- ❑ Protokoli višestrukog pristupa
- ❑ LAN
 - MAC adresiranje
 - Ethernet
 - VLAN
 - Switch
- ❑ WiFi
- ❑ Mobilne računarske mreže
- ❑ Mreža data centra

Igor Radusinović
Slavica Tomović
ETF, UCG

Nivo linka: Uvod

Terminologija:

- Hostovi i ruteri su čvorišta
- Komunikacioni kanali koji povezuju susjedna čvorišta duž komunikacionih puteva su linkovi
 - žični linkovi
 - bežični linkovi
 - LAN-ovi
- Paket nivoa 2 se zove okvir (*frame*), u kome je enkapsuliran datagram



Nivo linka ima odgovornost transfera datagrama od jednog čvorišta do susjednog čvorišta na linku

Nivo linka: kontekst

- ❑ Prenos datagrama različitim protokolima nivoa linka preko različitih linkova:
 - npr., WiFi na prvom linku, *MPLS* na međulinkovima, Ethernet na poslednjem linku
- ❑ Svaki protokol nivoa linka omogućava različite servise
 - npr., može ili ne može obezbijediti pouzdan prenos preko linka

Tigor Radusinović
Slavica Tomović
ETF, UCG

Servisi nivoa linka

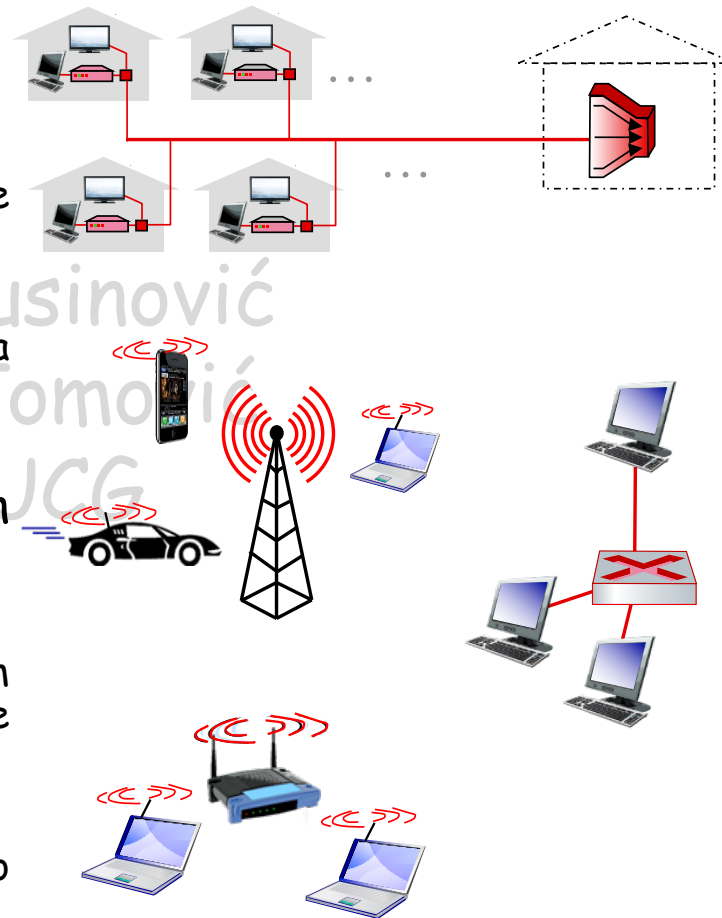
□ Kreiranje frejmova, pristup linku:

- Enkapsulacija datagrama u frejm, dodavanje zaglavlja/začelja
- Pristup kanalu ako je zajednički medijum
- “MAC” adrese se koriste u zaglavlju frejmova za identifikaciju izvora, destinacije
 - Razlikuju se od IP adresa!

□ Pouzdana predaja između susjednih čvorišta

- Već smo to radili!
- Često se ne koristi preko linkova sa niskom vjerovatnoćom greške po bitu (optika, neke bakarne upredene parice)
- Bežični linkovi: visoke vjerovatnoće greške

P: Zašto pouzdanost i na nivou linka i od kraja do kraja?



Servisi nivoa linka (više)

□ *Kontrola protoka:*

- Podešavanje brzina slanja čvorišta

□ *Detekcija greške:*

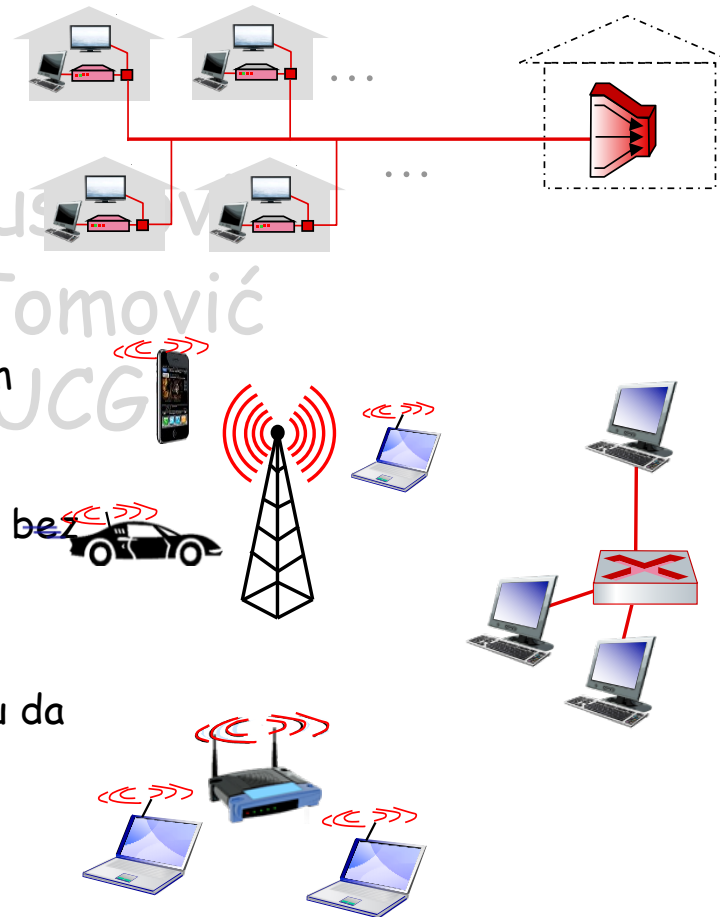
- Greške izazvane slabljenjem signala, šumom.
- Prijemnik detektuje prisustvo grešaka, signalizira pošiljaocu da odradi retransmisiju i odbacuje frejm

□ *Korekcija greške:*

- Prijemnik identifikuje i *koriguje* greške na bit(ima) bez novog sortiranja ili retransmisije frejmova

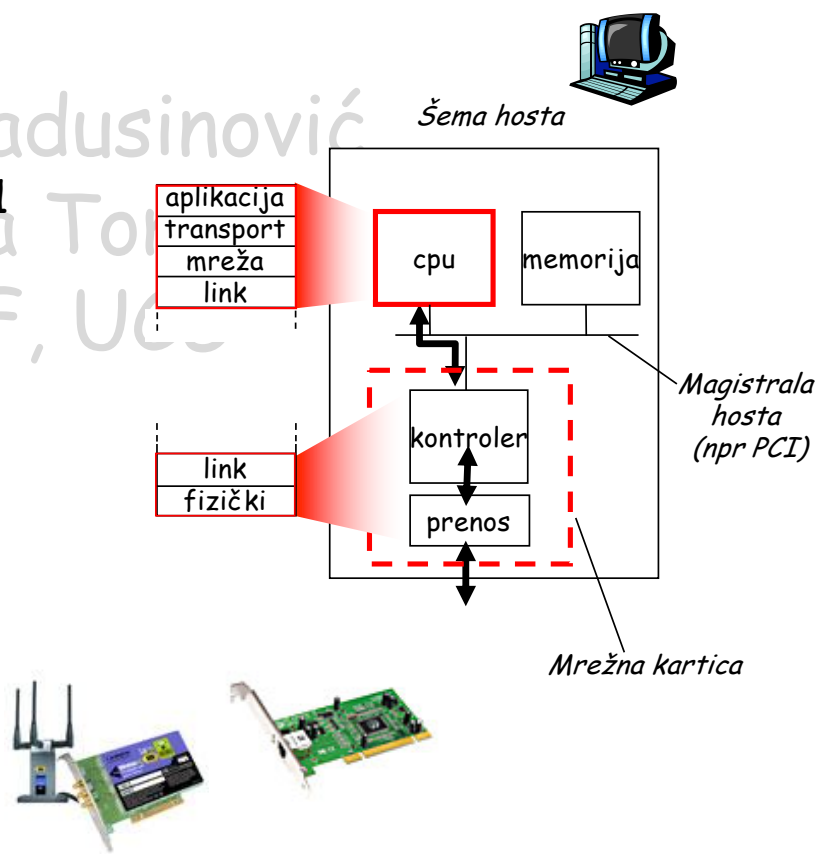
□ *Half-duplex i full-duplex*

- sa *half duplex*-om, čvorišta na oba kraja linka mogu da šalju podatke, ali ne u isto vrijeme

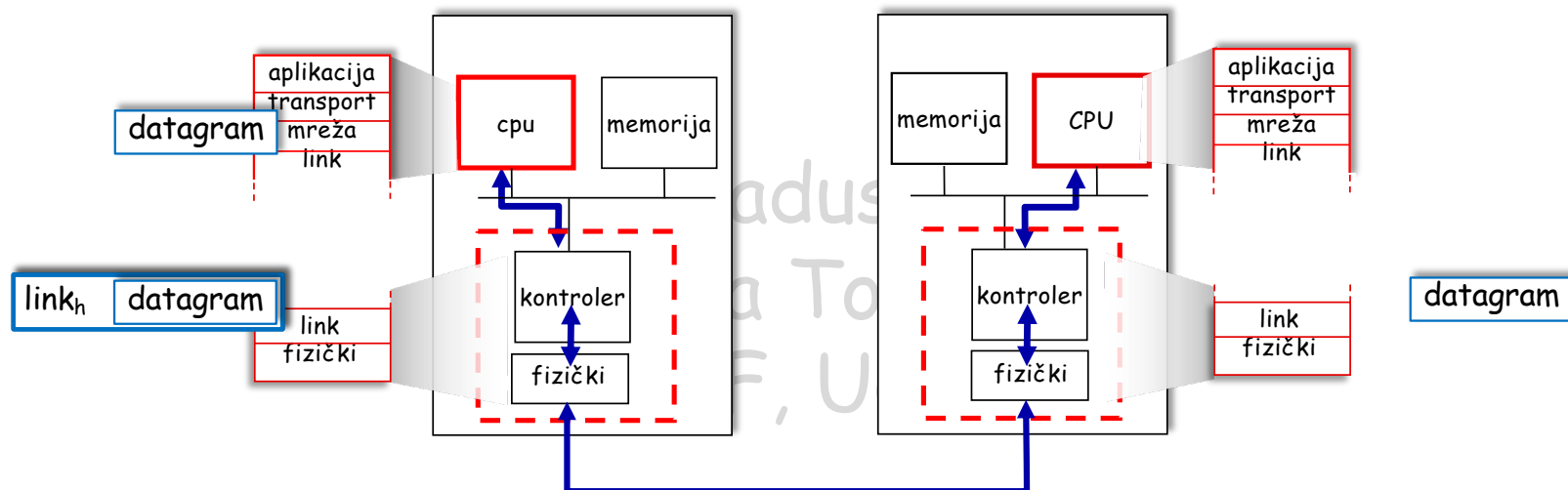


Gdje se implementira nivo linka?

- u svakom hostu, switchu, ruteru,...
- mrežni adapter (*network interface card* NIC)
 - Ethernet kartica, PCMCIA kartica, 802.11 kartica
 - Implementira fizički nivo i nivo linka
- Povezan na sistemsku magistralu
- kombinacija *hardware, software, firmware*



Komunikacija adaptera



❑ Predajna strana:

- Pakuje datagram u frejm
- U zaglavlju dodaje bite za provjeru greške, kontrolu protoka, pouzdani prenos

❑ Prijemna strana

- Traži greške, kontroliše sekvencionalnost,
- izvlači datagram, prosleđuje ga višem nivou prijemne strane

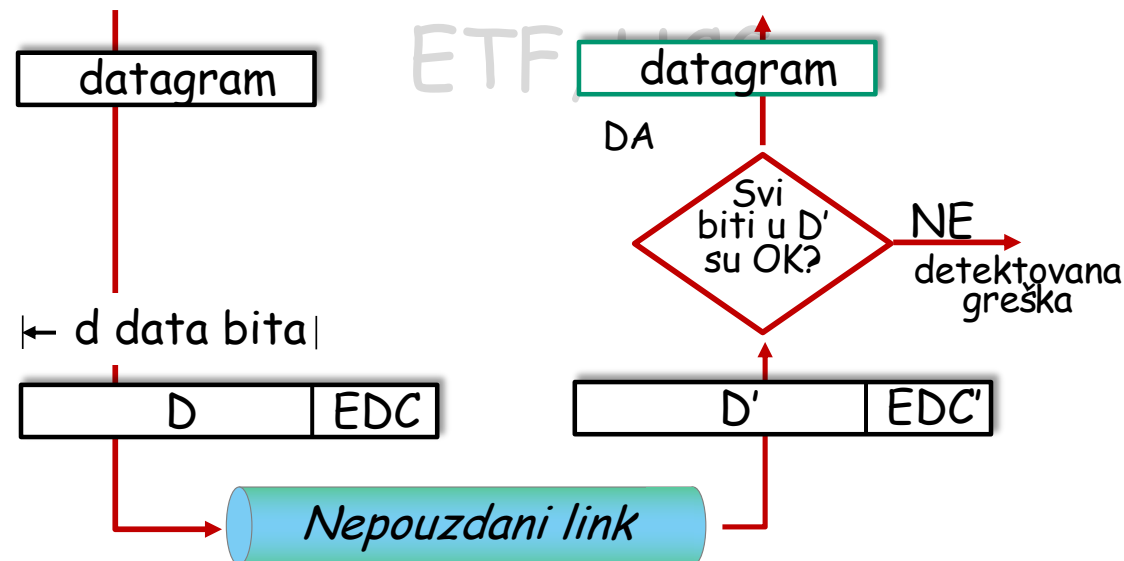
Nivo linka

- ❑ Uvod, servisi
- ❑ Detekcija i korekcija greške
- ❑ Protokoli višestrukog pristupa
- ❑ LAN
 - MAC adresiranje
 - Ethernet
 - VLAN
 - Switch
- ❑ WiFi
- ❑ 4G
- ❑ Mreža data centra

Todor Radusinović
Slavica Tomović
ETF, UCG

Detekcija greške

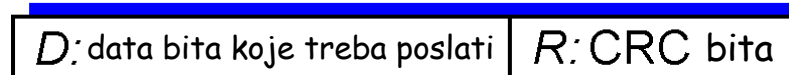
- ❑ EDC (*Error Detection and Correction*) su biti detekcije i korekcije greške (redundansa)
- ❑ D su podaci zaštićeni provjerom greške, mogu uključivati polja zaglavlja
- ❑ Detekcija greške nije 100% pouzdana!
 - protokol može propustiti neke greške
 - veće EDC polje vodi boljoj detekciji i većoj mogućnosti korekcije



Cyclic Redundancy Check

- ❑ data biti, D , se tretiraju kao binarni brojevi
- ❑ Izabere se $r+1$ bita dug generator, G
- ❑ cilj: izabrati R CRC bita, takvih da je
 - $\langle D, R \rangle$ tačno djeljivo sa G (po modulu 2)
 - Prijemniku je poznato G , dijeli $\langle D, R \rangle$ sa G . Ako ostatak nije nula: greška je detektovana!
 - Može detektovati sve grupe grešaka manje od $r+1$ bita
- ❑ Vrlo široka primjena u praksi (Ethernet, WiFi,...)

← d bita → ← r bita →



Biti za
slanje

$$D * 2^r \text{ XOR } R$$

Matematička
formula

Nivo linka

- ❑ Uvod, servisi
- ❑ Detekcija i korekcija greške
- ❑ Protokoli višestrukog pristupa
- ❑ LAN
 - MAC adresiranje
 - Ethernet
 - VLAN
 - Switch
- ❑ WiFi
- ❑ 4G
- ❑ Mreža data centra

Igor Radusinović
Slavica Tomović
ETF, UCG

Linkovi i protokoli višestrukog pristupa

Dva tipa “linkova”:

□ *point-to-point*

- PPP (*Point to Point Protocol*) za dial-up pristup
- *point-to-point* linkovi između *Ethernet switch-a* i hosta

□ *broadcast* (zajednički medijum)

- tradicionalni *Ethernet*
- *upstream* HFC u kablovskim mrežama
- WiFi, 4G/5G, satelit



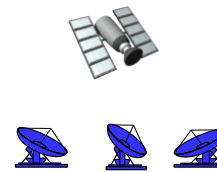
Zajednički medijum
(npr. Ethernet)



Dijeljenje radio
kanala - 4G/5G



Dijeljenje radio kanala -
WiFi



Dijeljenje radio
kanala (satelit)



Koktel zabava

Protokoli višestrukog pristupa

- ❑ Jedan dijeljeni kanal
- ❑ Dva ili više simultanih prenosa izazivaju interferenciju
 - kolizija ako čvorište primi dva ili više signala u istom trenutku

Protokol višestrukog pristupa

- ❑ distribuirani algoritam koji utvrđuje kako čvorišta dijele kanal, odnosno koje čvorište može da šalje
- ❑ komunikacija oko dijeljenja kanala se prenosi preko samog kanala!
 - nema *out-of-band* kanala za koordinaciju

Idealni protokol višestrukog pristupa

Difuzni kanal brzine prenosa R b/s

1. Kada čvorište želi da šalje, ono to može brzinom R .
2. Kada M čvorišta žele da šalju, svaki može da šalje prosječnom brzinom R/M
3. Potpuno decentralizovan:
 - nema specijalnog čvorišta za koordinaciju prenosa
 - nema sinhronizacije taktova, slotova
4. Jednostavan

Podjela MAC (*Medium Access Control*) protokola

Tri široke klase:

❑ Dijeljenje kanala

- Podijeliti kanal na manje djelove (vremenske slotove, frekvenciju, kod)
- Dodijeliti djelove kanala čvorištu na ekskluzivno korišćenje

❑ Slučajan pristup

- Kanal se ne dodjeljuje, dozvoljava kolizije
- Oporavak od kolizija

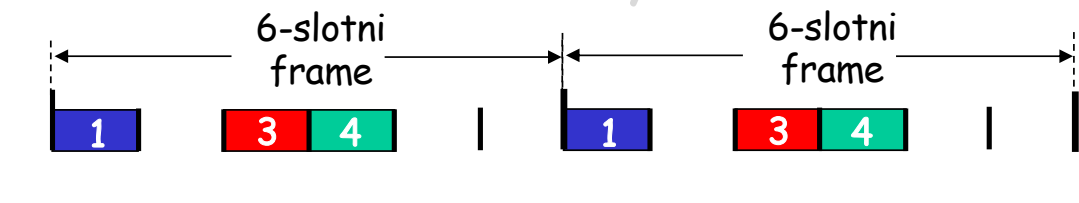
❑ “Uzimanje prava slanja”

- Čvorišta uzimaju pravo slanja. Čvorišta sa većim potrebama mogu uzimati pravo slanja više puta.

MAC protokoli dijeljenja kanala: TDMA

TDMA: *Time Division Multiple Access*

- ❑ Pristup kanalu u vremenskim “ciklusima”
- ❑ Svaka stanica dobija slot fiksne dužine (dužina = vremenu prenosa paketa) u svakom krugu
- ❑ Neiskorišćeni slotovi su slobodni
- ❑ LAN sa 6 stanica: 1,3,4 imaju paket, slotovi 2,5,6 su slobodni



- ❑ TDM (*Time Division Multiplexing*): kanal se dijeli na N vremenskih slotova, po jedan po korisniku; neefikasan za nisko opterećenje i korisnike koji kratko vrijeme zauzimaju resurse

Protokoli slučajnog pristupa

- ❑ Kada čvorište ima paket za slanje
 - prenosi punom brzinom prenosa na kanalu R.
 - nema *a priori* koordinacije između čvorišta
- ❑ Dva ili više čvorišta šalje → “kolizija”,
- ❑ MAC protokol slučajnog pristupa specificira:
 - Kako detektovati koliziju
 - Kako se oporaviti od kolizije (npr., preko zakašnjelih retransmisija)
- ❑ Primjeri ovih MAC protokola:
 - *slotted* ALOHA, ALOHA
 - CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA

Slotted ALOHA

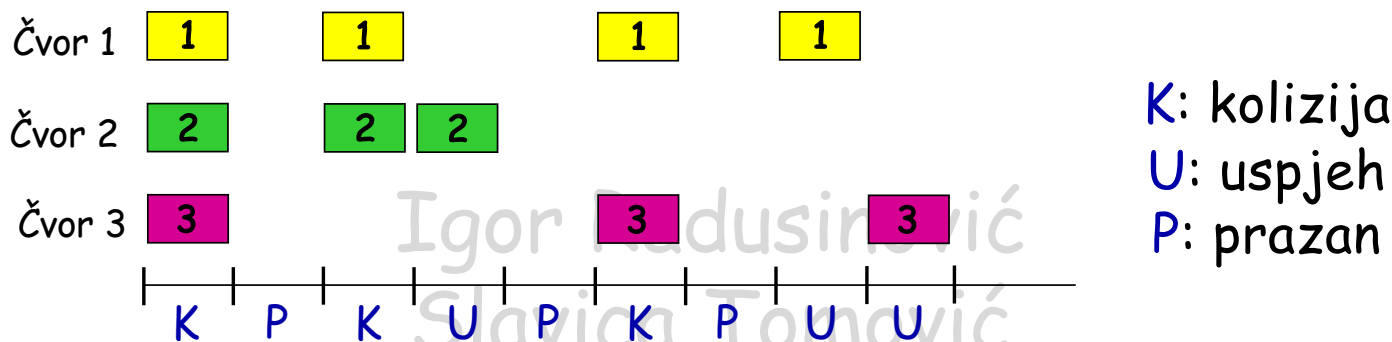
Pretpostavke

- ❑ Svi frejmovi su iste veličine
- ❑ Vrijeme je podijeljeno na slotove jednakih dužina trajanja potrebnog za prenos jednog frejma
- ❑ Čvorišta počinju da šalju odmah na početku slotu
- ❑ Čvorišta su sinhronizovana
- ❑ Ako 2 ili više čvorišta šalju u slotu, sva čvorišta detektuju koliziju

Funkcionisanje

- ❑ Kada čvorište dobije novi frejm za slanje, šalje ga u narednom slotu
 - Nema kolizije, čvorište može slati frejm u narednom slotu
 - Ako se desi kolizija, čvorište ponovo šalje frejm u svakom narednom slotu sa vjerovatnoćom p do uspjeha

Slotted ALOHA



Za

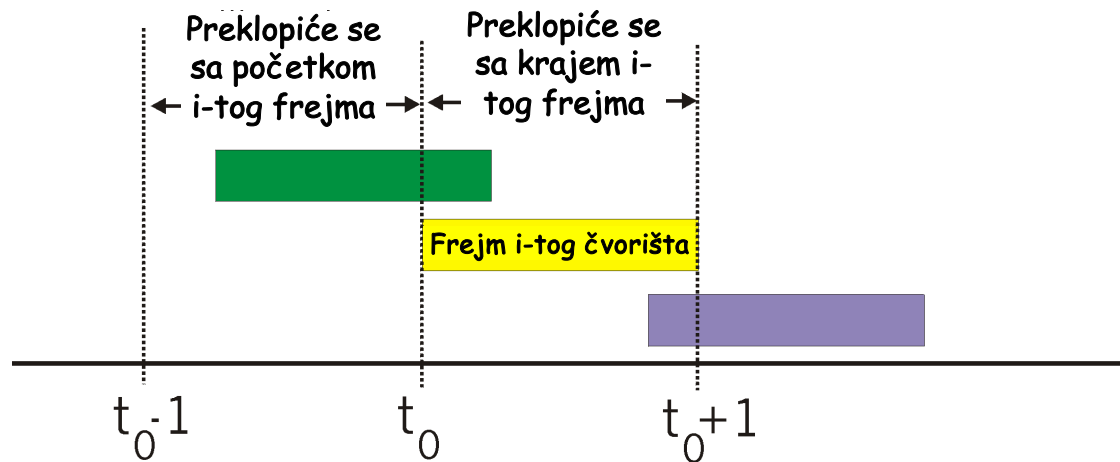
- jedno aktivno čvorište može kontinualno slati punom brzinom kanala
- visoko decentralizovano: samo slotovi u čvorištima treba da budu sinhronizovani
- jednostavan

Protiv

- kolizije, gubitak slotova
- prazni slotovi
- čvorišta moraju biti u mogućnosti da detektuju kolizije u kraćem vremenu od vremena prenosa paketa
- sinhronizacija takta
- efikasnost svega 37%

Obična (unslotted) ALOHA

- ❑ *Unslotted* Aloha: jednostavnija, nema sinhronizacije
- ❑ Kada se frejm kreira odmah se šalje
- ❑ Vjerovatnoća kolizije raste:
 - Frejm poslat u t_0 ulazi u koliziju sa ostalim frejmovima poslatim u $[t_0-1, t_0+1]$
- ❑ Efikasnost svega 18%



CSMA (Carrier Sense Multiple Access)

CSMA: "slušaj prije nego pošalješ":

- ❑ Ako je kanal slobodan: šalji kompletan frejm
- ❑ Ako je kanal zauzet, odloži slanje
- ❑ Analogija: ne prekidaj nekog dok priča!

CSMA kolizije

Kolizije se još uvijek mogu pojaviti:
Propagaciono kašnjenje može izazvati da dva čvorišta ne čuju da je ono drugo aktivno

Kolizije:

Čitavo vrijeme prenosa paketa je izgubljeno

Napomena:

Uloga rastojanja & kašnjenja uslijed propagacije određuje vjerovatnoću kolizije



CSMA/CD (Collision Detection)

CSMA/CD: "osluškivanje prisustva nosioca"

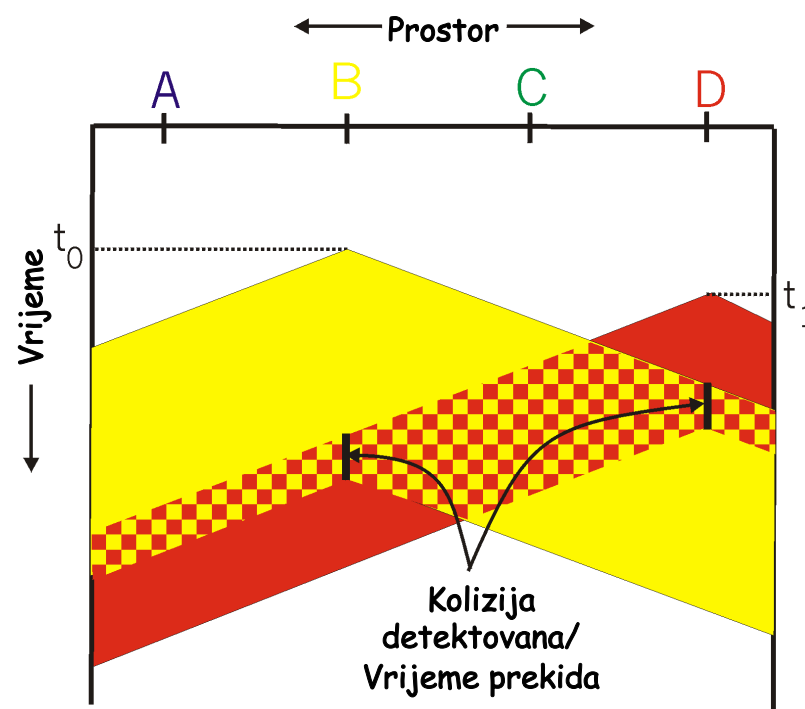
- Detekcija kolizije u kratkom vremenu
- Prenosi u koliziji se prekidaju tako da se beskorisno korišćenje kanala smanjuje

□ Detekcija kolizije:

- Laka u žičnim LAN-ovima: mjerenje snage signala, upoređenje poslatih i primljenih signala
- Teško u WLAN-ovima: prijemnik ćuti dok se šalje

□ Analogija: ljubazna konverzacija

CSMA/CD detekcija kolizije



MAC protokoli “Uzimanje prava”

MAC protokoli dijeljenja kanala:

- Diješe kanal efikasno i fer pri visokim opterećenjima
- Neefikasni na niskim opterećenjima: kašnjenje u pristupu kanala, $1/N$ dio opsega je dodijeljen čak i ako je samo jedno čvorište aktivno!

MAC protokoli slučajnog pristupa

- Efikasni pri niskom opterećenju: jedno čvorište može koristiti kompletan kanal
- Visoko opterećenje: kolizija preovladava

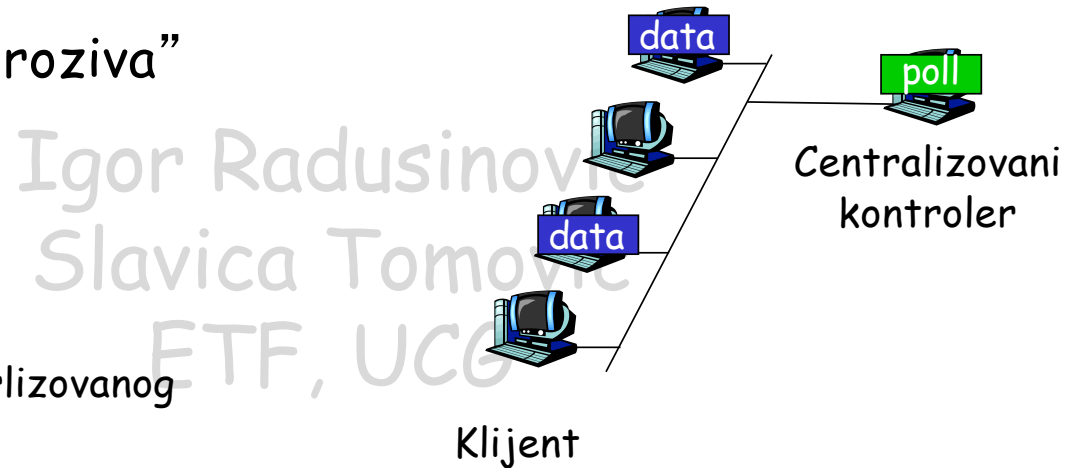
Protokoli “uzimanja prava”

Traže najbolje iz oba prethodna slučaja!

MAC protokoli “Uzimanje prava”

Polling:

- ❑ Centralizovani kontroler “proziva” klijente da šalju
- ❑ problemi:
 - *polling* zaglavlje
 - kašnjenje
 - nepouzdanost zbog otkaza centralizovanog kontrolera



MAC protokoli “Uzimanje prava”

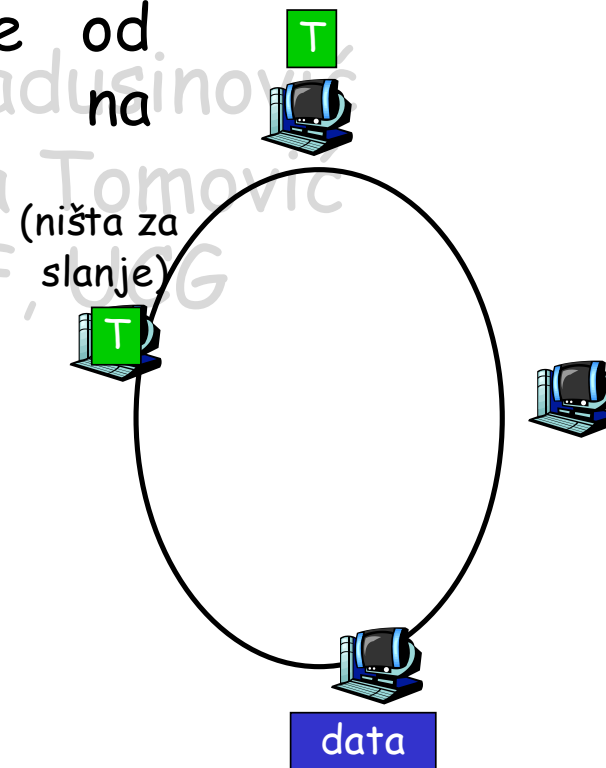
Prosleđivanje tokena:

- ❑ Kontrolni token se prosleđuje od jednog čvorišta do drugog na sekvencionalan način.

- ❑ Token frejm

- ❑ Problemi:

- zaglavlje tokena
- kašnjenje
- nepouzdanost zbog gubitka tokena



Nivo linka

- ❑ Uvod, servisi
- ❑ Detekcija i korekcija greške
- ❑ Protokoli višestrukog pristupa
- ❑ LAN
 - MAC adresiranje
 - Ethernet
 - VLAN
 - Switch
- ❑ WiFi
- ❑ 4G
- ❑ Mreža data centra

Igor Radusinović
Slavica Tomović
ETF, UCG

MAC adrese i ARP

❑ 32-bitna IP adresa:

- adresa mrežnog nivoa
- koristi se za prosleđivanje na 3. nivou

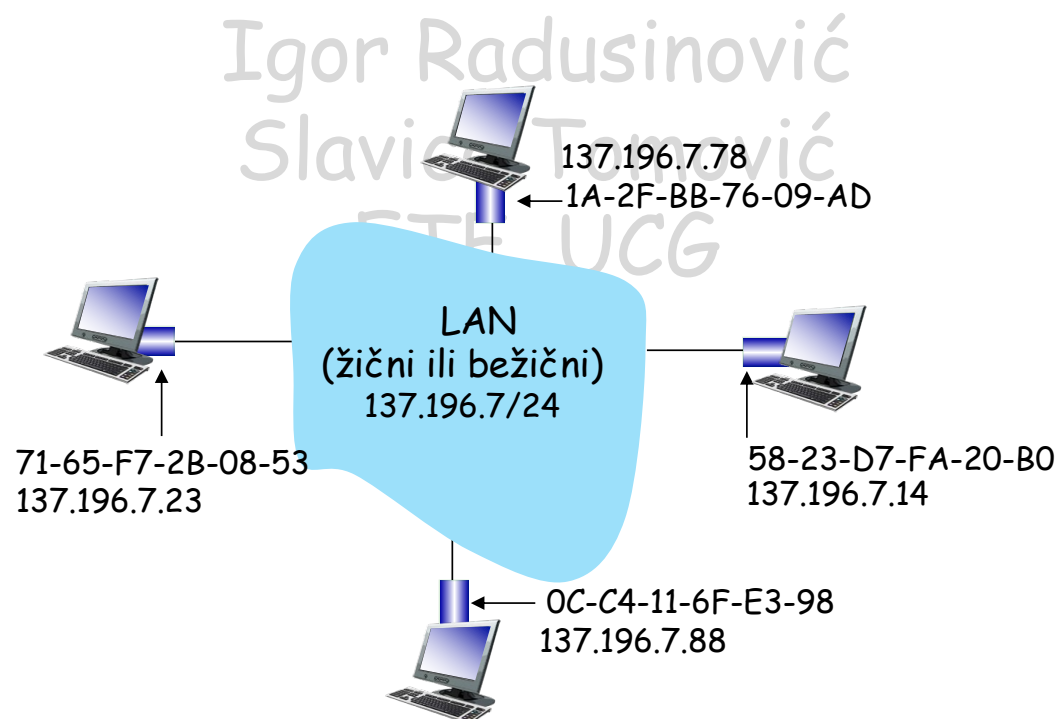
❑ MAC (ili LAN ili fizička ili Ethernet) adresa:

- funkcija: *koristi se "lokalno" kako bi se frejm proslijedio sa interfejsa na interfejs sa kojim je fizički povezan (u istoj mreži sa stanovišta IP adresiranja)*
- 48 bitna MAC adresa (za većinu LAN mreža) se upisuje u NIC ROM, mada se može i softverski setovati
- Heksadecimalni zapis
 - 1A-2F-BB-76-09-AD

LAN adrese i ARP

Svaki adapter u LAN-u ima jedinstvenu

- ☐ LAN adresu
- ☐ IP adresu

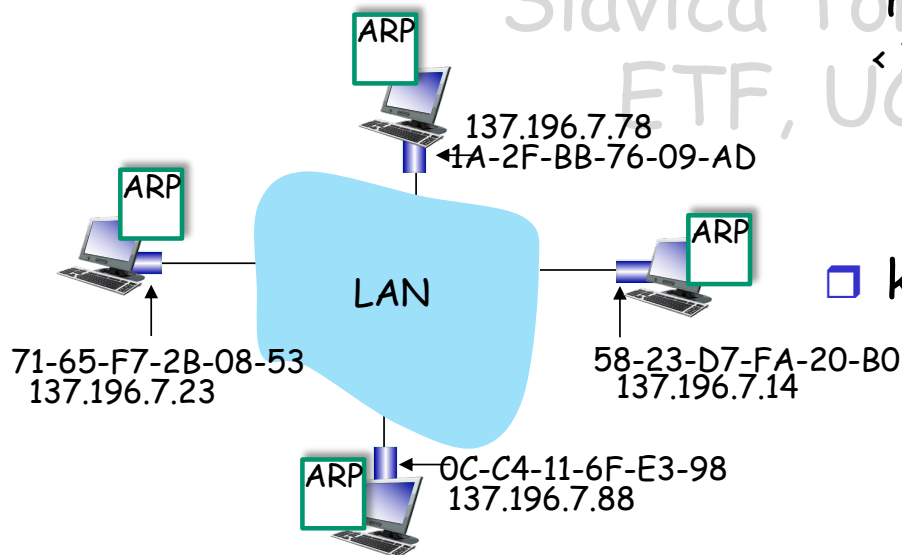


LAN adrese (više)

- ❑ IEEE dodjeljuje MAC adrese
- ❑ Proizvođači kupuju dio MAC adresnog prostora (da bi obezbijedili jedinstvenost adrese)
- ❑ Analogija:
 - MAC adresa: kao matični broj
 - IP adresa: kao poštanska adresa
- ❑ MAC nehijerarhijska adresa → portabilnost
 - LAN kartica se može seliti iz mreže u mrežu
- ❑ IP hijerarhijska adresa NIJE portabilna
 - zavisi od IP mreže na koju je čvorište vezano

ARP: Address Resolution Protocol

Kako se dobija MAC adresa hosta B ako se zna njegova IP adresa?

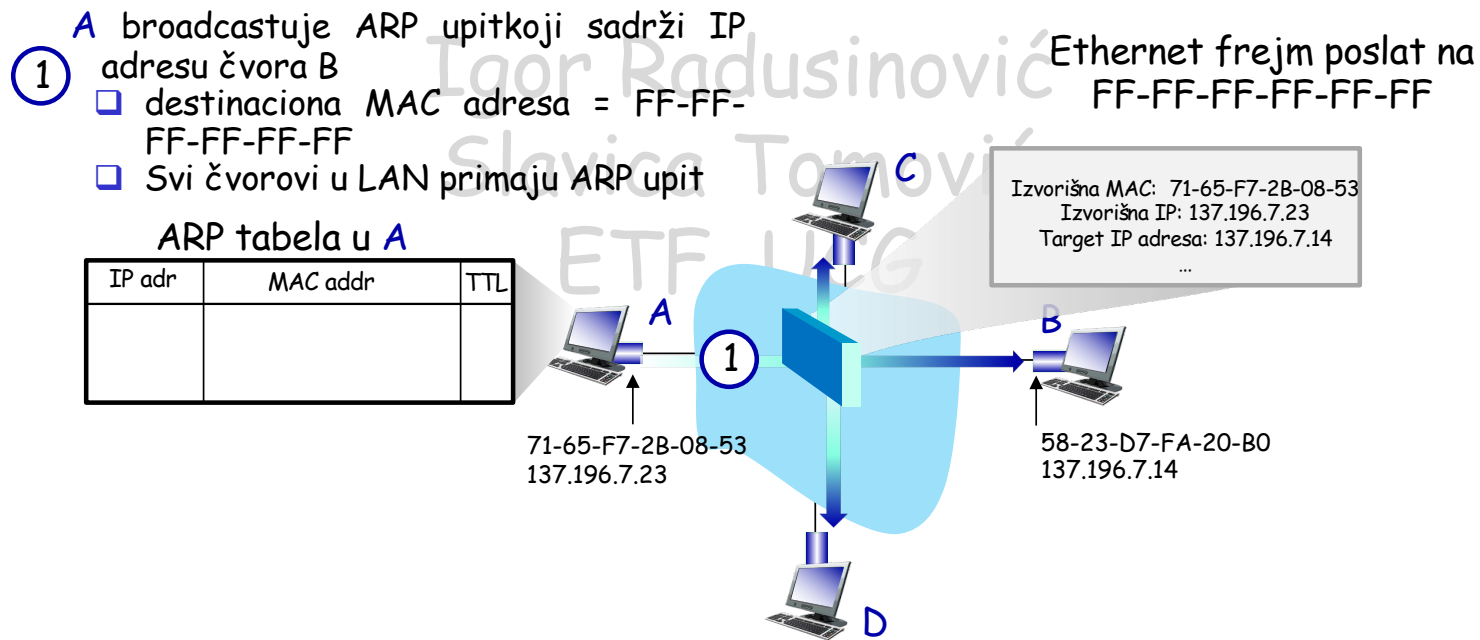


- Svako IP čvorište (Host, Ruter) na LAN-u ima svoju ARP tabelu
- ARP tabela: IP/MAC adresno mapiranje za neka LAN čvorišta
 - < IP adresa; MAC adresa; TTL >
 - TTL (*Time To Live*): vrijeme poslije kojega će adresno mapiranje biti zaboravljeno (obično 20 min)
- komanda arp -a

ARP: isti LAN

A šalje datagram čvoru B

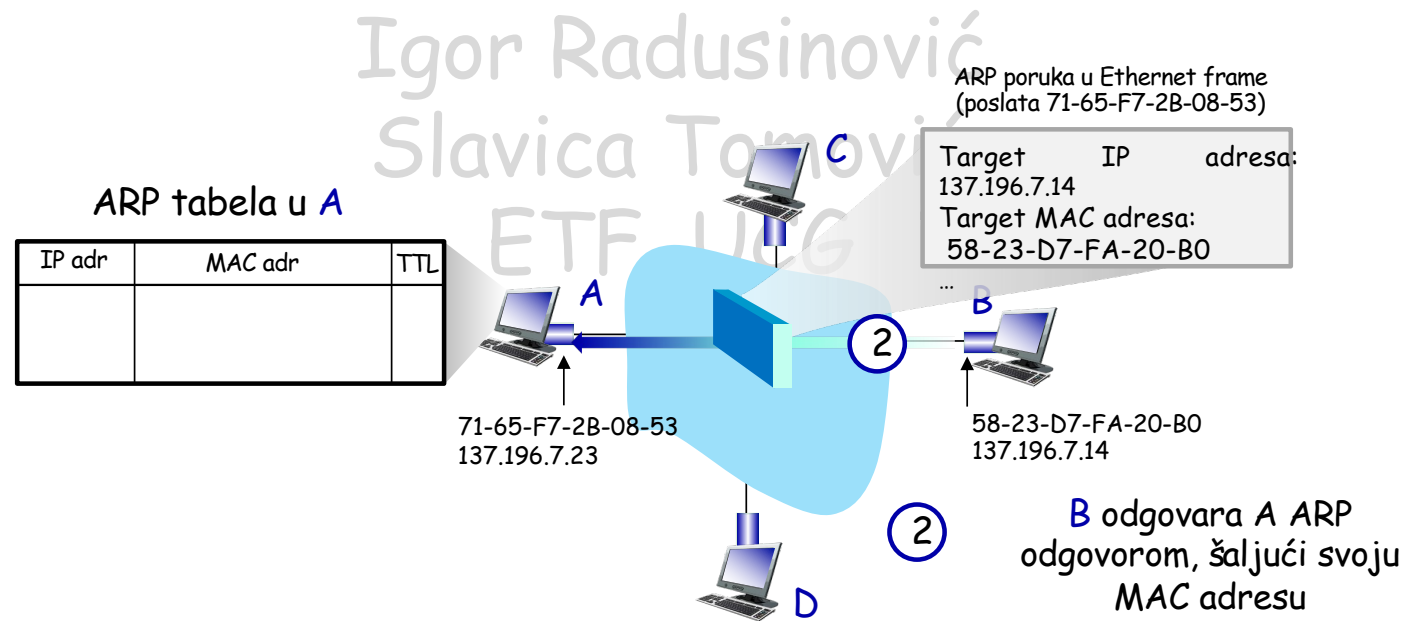
- MAC adresa čvora B nije u ARP tabeli čvora A, A koristi ARP da pronađe MAC adresu čvora B



ARP: isti LAN

A šalje datagram čvoru B

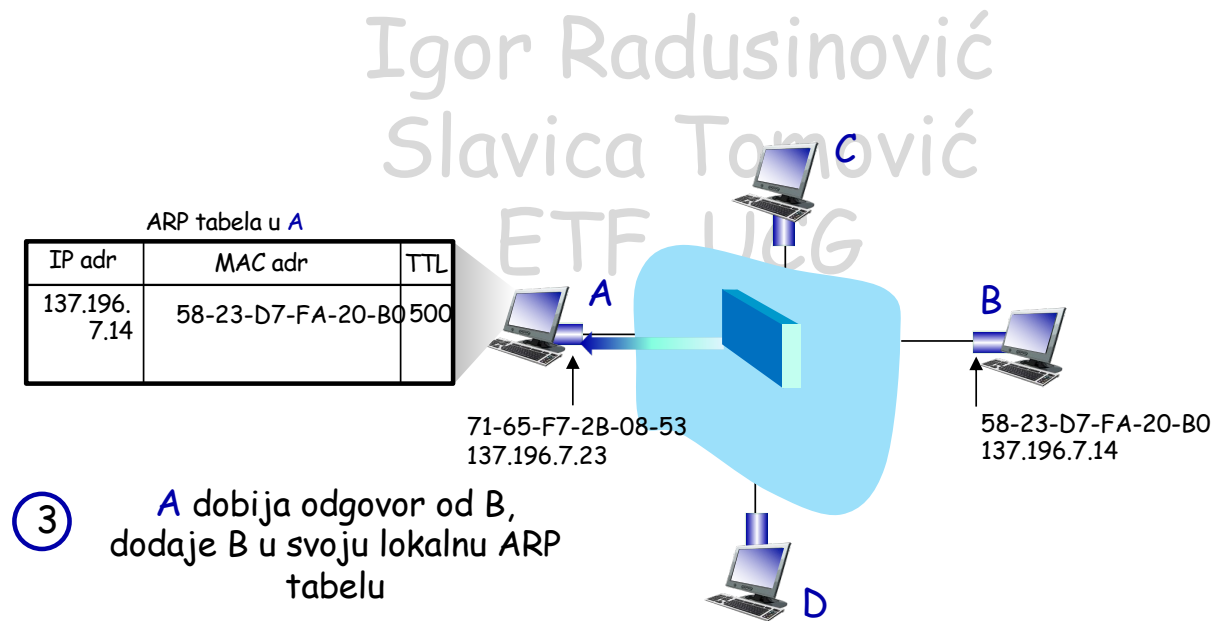
- MAC adresa čvora B nije u ARP tabeli čvora A, A koristi ARP da pronade MAC adresu čvora B



ARP: isti LAN

A šalje datagram čvoru B

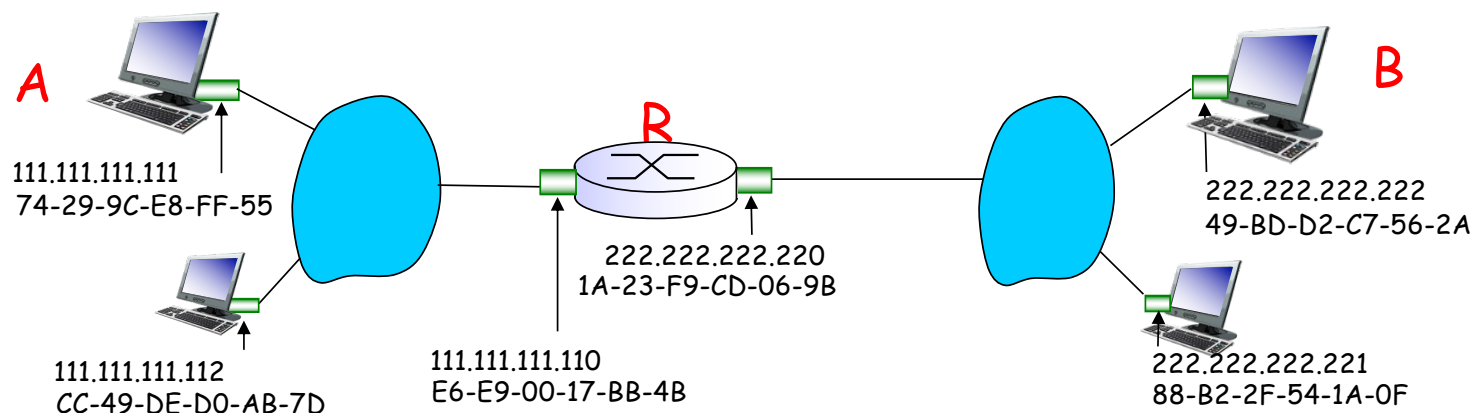
- MAC adresa čvora B nije u ARP tabeli čvora A, A koristi ARP da pronade MAC adresu čvora B



Adresiranje: rutiranje do druge LAN

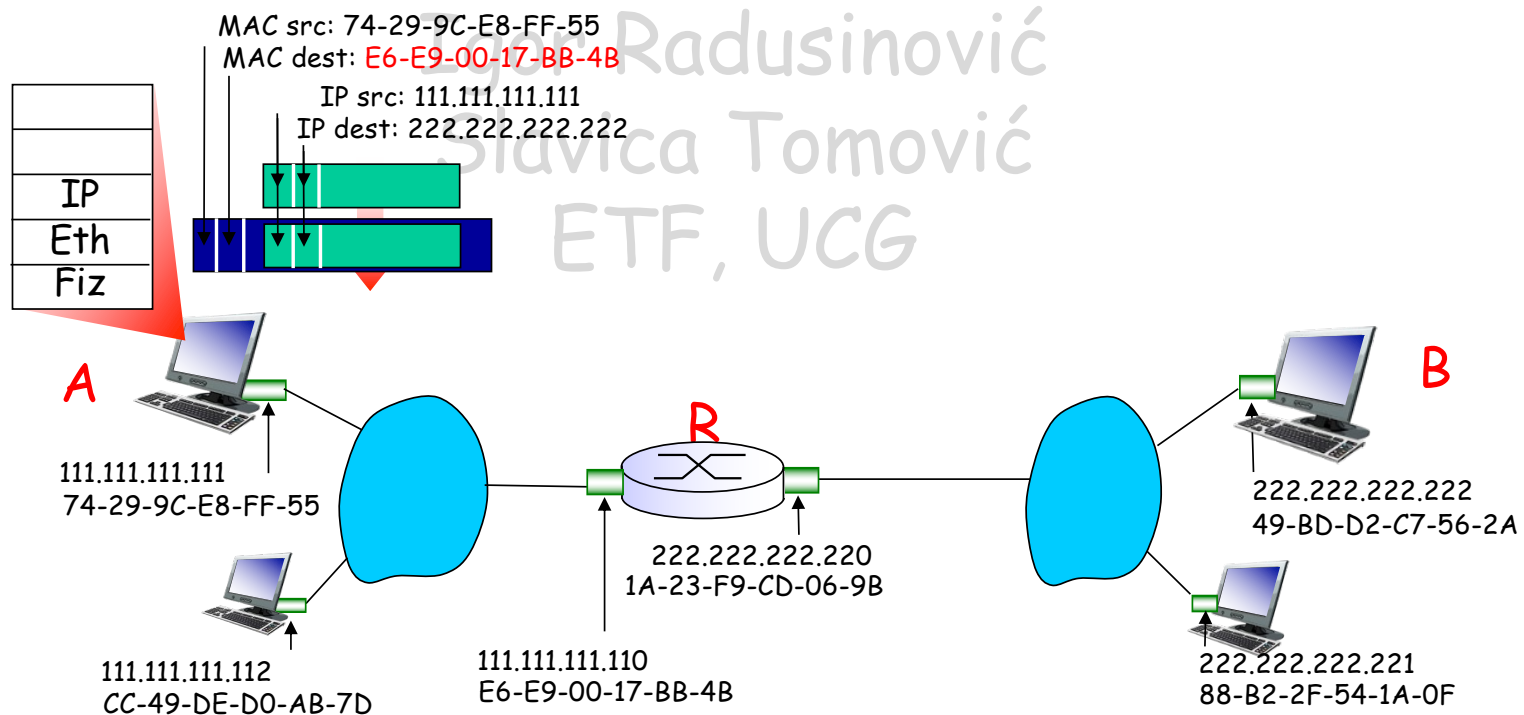
Zadatak: poslati datagram od A do B preko R

- fokus na adresiranju u IP datagranu i MAC frejmu
- pretpostaviti da A poznaje
 - IP adresu hosta B
 - IP adresu rutera R (kako?)
 - MAC adresu rutera R (kako?)



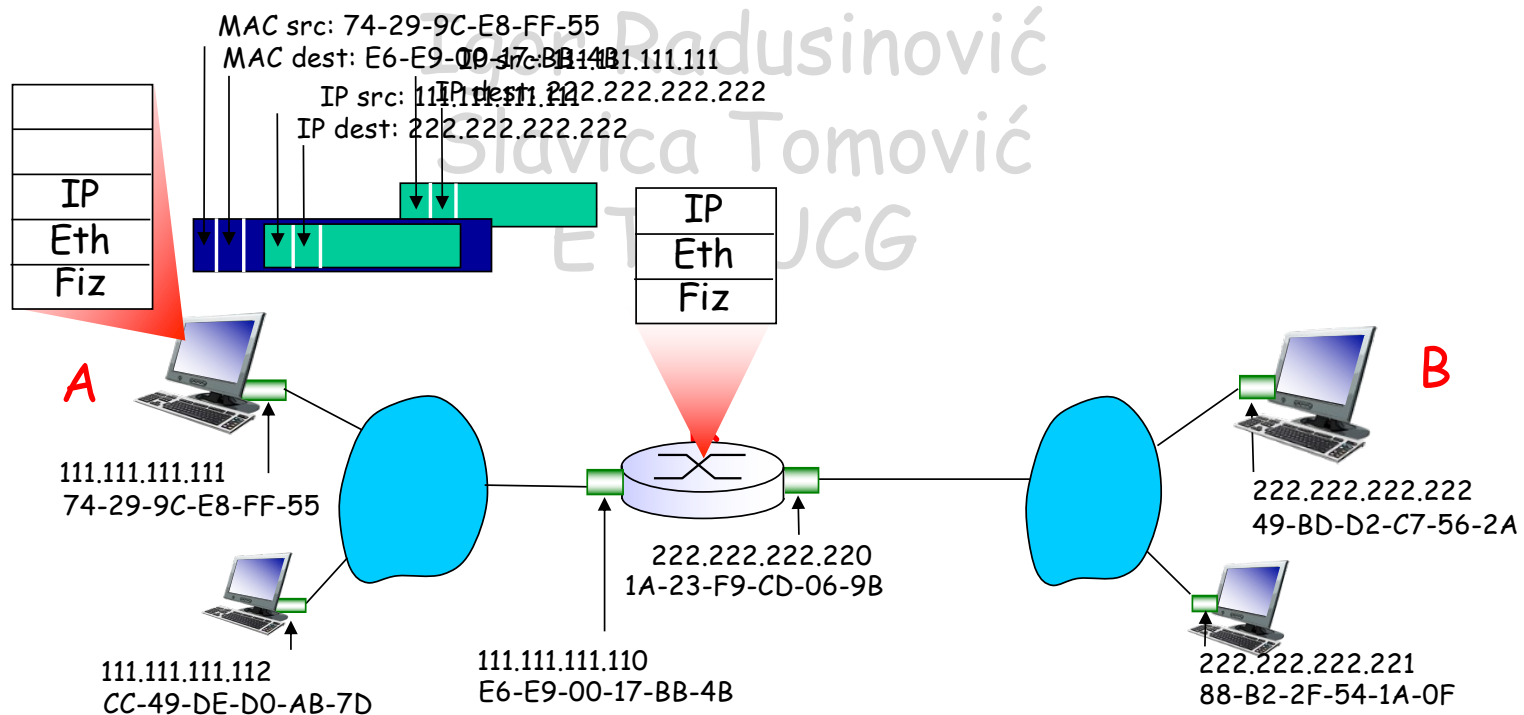
Adresiranje: rutiranje do druge LAN

- A kreira IP datagram sa IP izvorišnom adresom A, destinacionom B
- A kreira frejm sa MAC adresom rutera R kao destinacijom, frejm sadrži IP datagram koji treba da se prenese od A do B



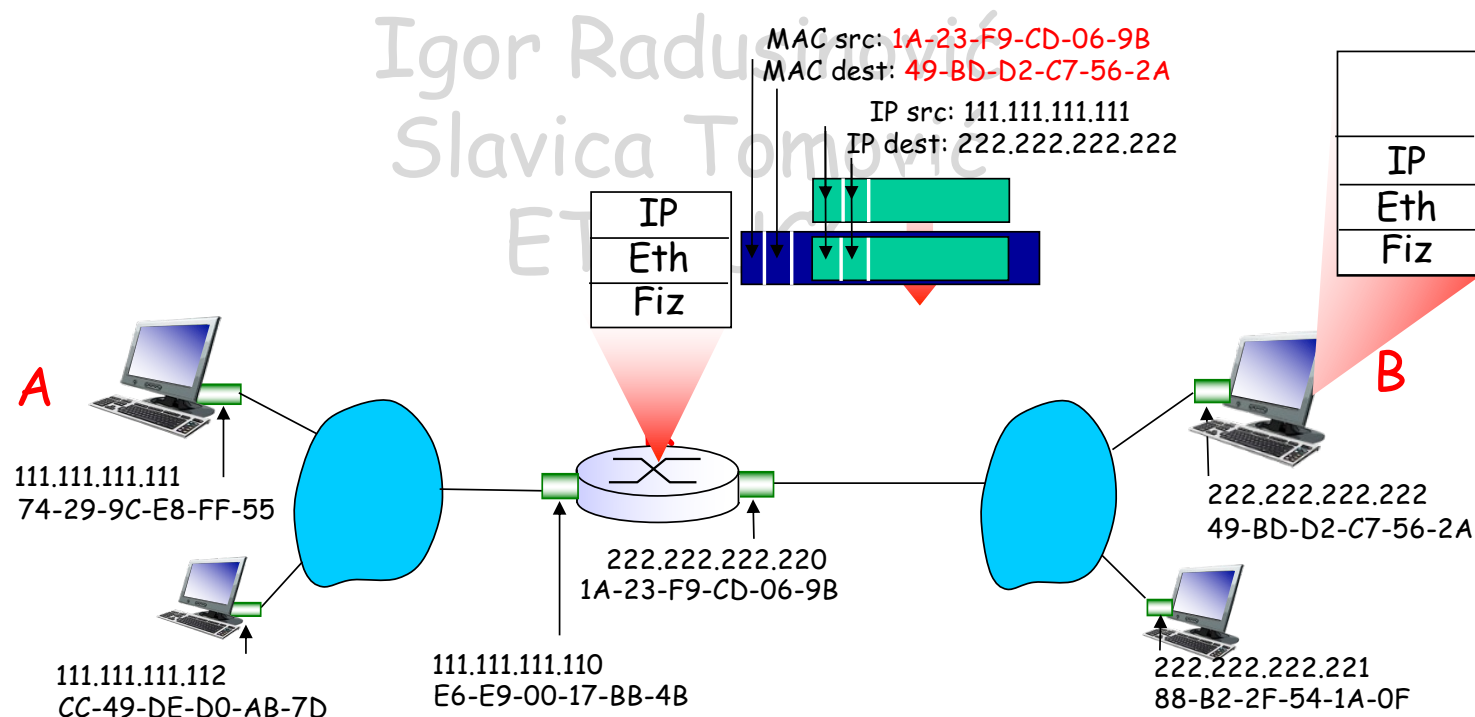
Adresiranje: rutiranje do druge LAN

- Frejm se šalje od A do R
- R prima frejm, datagram se prosleđuje IP protokolu na obradu



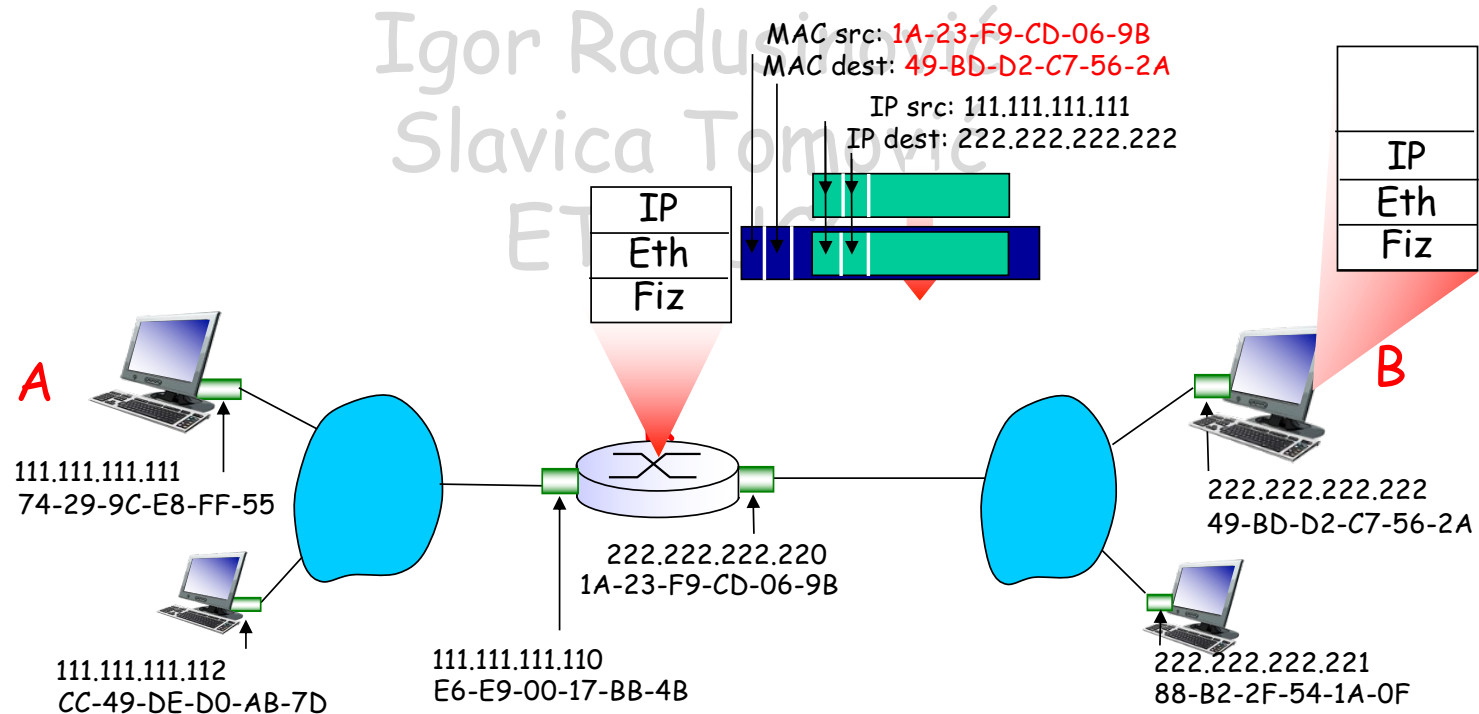
Adresiranje: rutiranje do druge LAN

- R prosleđuje datagram sa izvorišnom IP adresom A, destinacijom B
- R kreira frejm nivoa linka sa MAC adresom B kao destinacijom, frejm sadrži IP datagram koji treba da se prenese od A za B



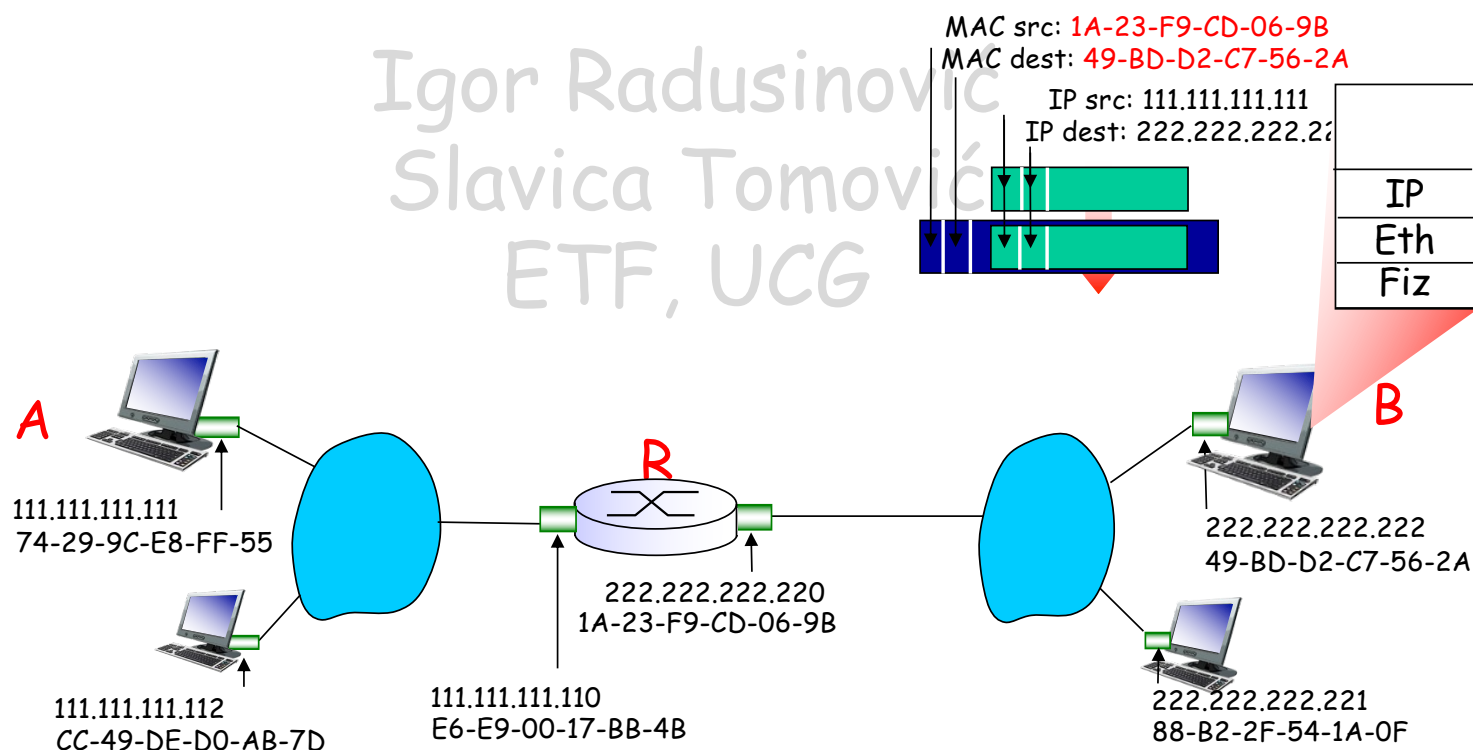
Adresiranje: rutiranje do druge LAN

- R prosleđuje datagram sa izvorišnom IP adresom A, i destinacionom B
- R kreira frejm sa MAC adresom B kao destinacijom, frejm sadrži datagram koji treba prenijeti od A do B



Adresiranje: rutiranje do druge LAN

- R prosleđuje datagram sa izvorišnom IP adresom A i destinacijom B
- R kreira frejm sa MAC adresom B kao destinacijom, frejm sadrži IP datagram koji treba preneti od A do B



Nivo linka

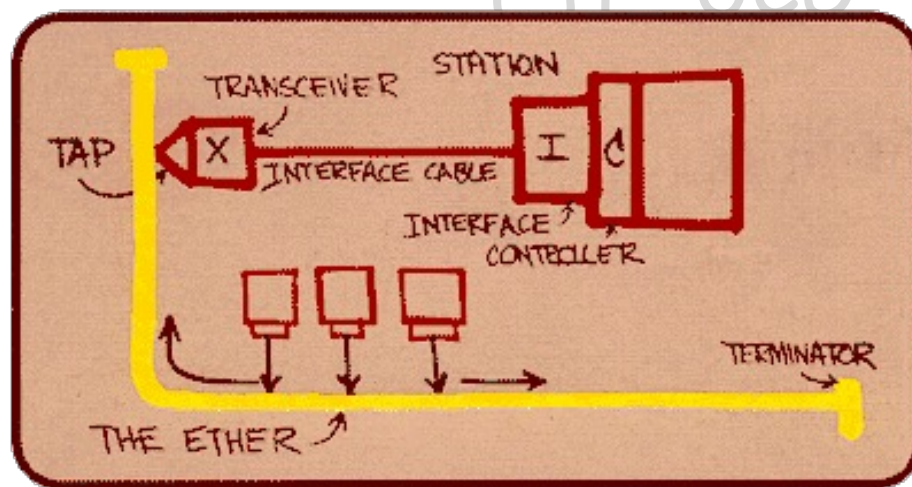
- ❑ Uvod, servisi
- ❑ Detekcija i korekcija greške
- ❑ Protokoli višestrukog pristupa
- ❑ LAN
 - MAC adresiranje
 - Ethernet
 - VLAN
 - Switch
- ❑ WiFi
- ❑ 4G
- ❑ Mreža data centra

Igor Radusinović
Slavica Tomović
ETF, UCG

Ethernet

“dominantna” žična LAN tehnologija:

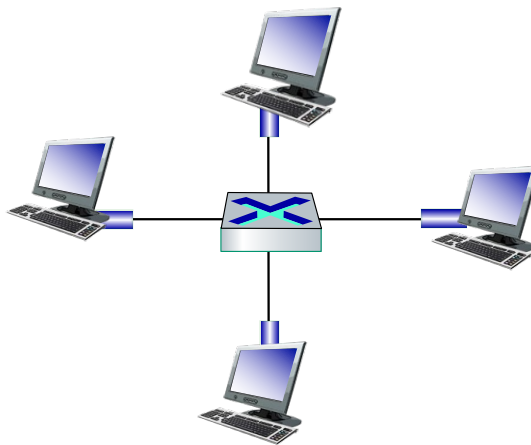
- ❑ Prva široko korišćena LAN tehnologija
- ❑ Jednostavan i jeftin
- ❑ Jedan čip, više brzina prenosa
- ❑ Široki opseg brzina prenosa: 10 Mb/s - Tb/s



Metcalfe-ova skica
Etherneta

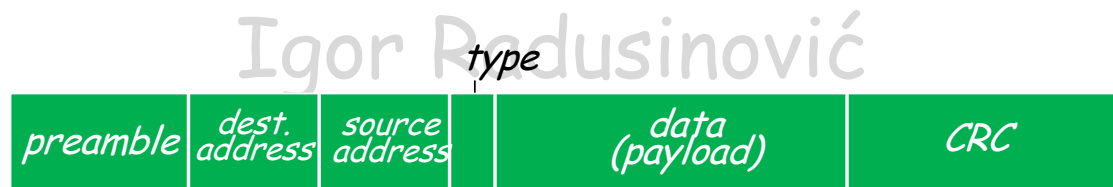
Topologija zvijezda

- ❑ Topologija magistrala je bila popularna devedesetih
- ❑ Sada se koristi zvijezda topologija
- ❑ *Switch* u centru
- ❑ Svaki računar posebno izvršava Ethernet protokol tako da nema kolizije



Struktura Ethernet frejma

Adapter pošiljaoca enkapsulira IP datagram (ili neki drugi paket nivoa mreže) u Ethernet frejm



Preamble (8B):

- ❑ 7 B sa sadržajem 10101010 praćenim sa 1B sadržaja 10101011
- ❑ Služi za sinhronizaciju prijemnika i predajnika

Struktura Ethernet Frejma (više)

□ Adrese (6B):

- Ako adapter primi frejm sa odgovarajućom destinacionom ili broadcast adresom (npr. ARP paket), prosleđuje podatke iz frejma protokolu mrežnog nivoa
- U suprotnom, adapter odbacuje frejm

□ Type(2B): ukazuje na protokol nivoa mreže (IPv4 (0800) i IPv6 (86DD))

□ CRC(4B): provjera greške na prijemu, ako je detektovana greška, frejm se odbacuje (CCITT-32 CRC)

$$x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$$



Nepouzdana, nekonektivni servis

- ❑ Nekonektivan: Nema *handshaking* procedure između predajnog i prijemnog adaptera.
- ❑ Nepouzdan: prijemni adapter ne šalje pozitivne ili negativne potvrde prijema predajnom adapteru
 - tok datagrama koji se prosleđuje nivou mreže može imati praznina
 - praznine popunjava TCP, ako se koristi
 - u suprotnom, aplikacija će vidjeti praznine
- ❑ Ethernet koristi CSMA/CD kao MAC protokol

Ethernet CSMA/CD algoritam

- nema slotova
- adapter ne prenosi ako osjeti da neki drugi adapter šalje, to je, *carrier sense*
- predajni adapter prekida slanje ako osjeti da i drugi adapter šalje, to je, *collision detection*
- prije pokušaja retransmisije, adapter čeka slučajno vrijeme, to je, *random access*

Ethernet CSMA/CD algoritam

1. Adapter prima datagramsa nivoa mreže i kreira frejm
2. Ako adapter osjeti
 - slobodan kanal (u trajanju od 96 bita), počinje da šalje frejm.
 - zauzet kanal čeka dok se kanal oslobodi i onda šalje
3. Ako adapter pošalje kompletan frejm bez detekcije drugog prenosa, smatra se da je prenos bio uspješan !
4. Ako adapter detektuje drugi prenos dok šalje frejm, prekida slanje frejma i šalje *jam* signal
5. Poslije prekida, adapter ulazi u eksponencijalni *backoff*: poslije m -te kolizije, adapter bira K na slučajan način iz opsega $\{0,1,2,\dots,2^m-1\}$. Adapter čeka u trajanju $K \cdot 512$ bita i vraća se na korak 2.

Ethernet CSMA/CD (više)

Jam Signal: služi da svi interfejsi detektuju koliziju; 48b

Trajanje bita: $0.1 \mu s$ za 10Mb/s Ethernet ;
za $K=1023$, vrijeme čekanja je oko 50 ms

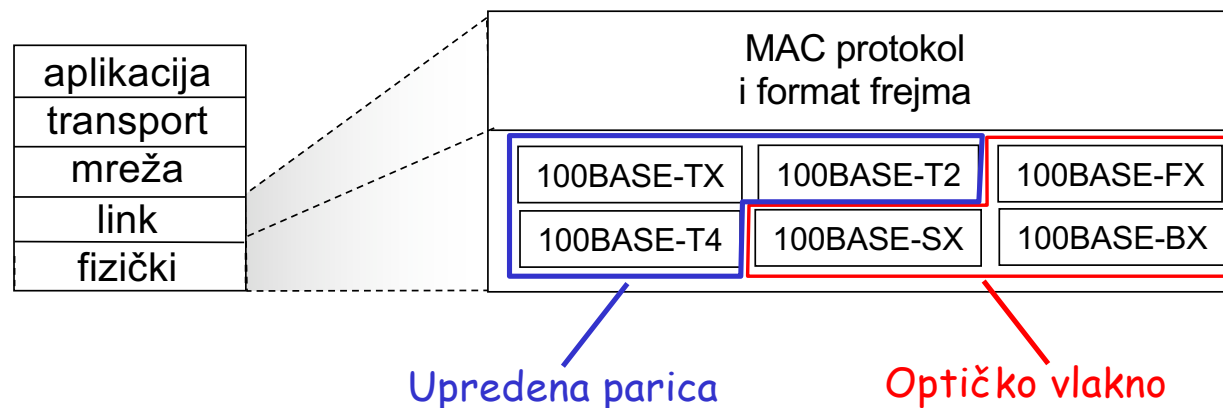
Eksponencijalni *Backoff*:

- *Cilj*: adaptirati pokušaje retransmisije kako bi se estimiralo trenutno opterećenje
 - Veliko opterećenje: slučajno kašnjenje će biti duže
- Prva kolizija: izaberi K iz $\{0,1\}$; kašnjenje je jednako 0 ili trajanju 512 bita
- Poslije druge kolizije: bira K iz $\{0,1,2,3\}$...
- Poslije deset kolizija, nira K iz $\{0,1,2,3,4,\dots,1023\}$
- Nakon 10 kolizija adapter odustaje!

802.3 Ethernet Standardi: fizički nivo i nivo linka

□ mnogo različitih Ethernet standarda

- zajednički MAC protokol i format frejma
- Različite brzine: 2Mb/s, 10Mb/s, 100Mb/s, 1Gb/s, 10Gb/s, 25Gb/s, 40Gb/s, 100Gb/s, 400Gb/s
- Očekuje se standardizacija Terabit Ethernet
- Medijumi za prenos: optičko vlakno, upredena parica,...



Fast Ethernet

	100baseT4	100baseT	100baseFX
Medium	Upredena parica kategorije 3 UTP 4 parice	Upredena parica kategorije 5 UTP 2 parice	Optičko multimode vlakno Dva vlakna
Maksimalna veličina segmenta	100 m	100 m	2 km
Topologija	Zvijezda	Zvijezda	Zvijezda

Da bi se postigla kompatibilnost sa 10Mb/s Ethernet-om:

- ❑ Isti format frejma, isti interfejs, isti protokoli
- ❑ Hub topologija samo sa upredenom paricom ili vlaknom
- ❑ Magistrala topologija & koaksijalac se ne koriste
- ❑ Kategorija 3 upredena parica (telefonski) zahtijeva 4 parice
- ❑ Kategorija 5 upredena parica zahtijeva 2 parice (najpopularnija)
- ❑ Najčešće korišćeni LAN danas

Gigabit Ethernet

	1000baseSX	1000baseLX	1000baseCX	1000baseT
Medium	Optičko multimodno vlakno Dva vlakna	Optičko monomodno vlakno Dva vlakna	Oklopljena bakarna parica	Upredna parica kategorije 5 UTP
Maksimalna veličina segmenta	550 m	5 km	25 m	100 m
Topologija	Zvijezda	Zvijezda	Zvijezda	Zvijezda

- ❑ Vrijeme slot-a povećano na 512B
- ❑ Mali frejmovi moraju biti povećani na 512B
- ❑ Grupisanje frejmova kako bi se dozvolilo stanicama da prenose grupe kratkih frejmova
- ❑ Struktura frejma je zadržana ali je CSMA-CD izbjegnuto
- ❑ Intenzivno se primjenjuje na kičmama mreža i za povezivanje servera

10 Gigabit Ethernet

	10GbaseSR	10GBaseLR	10GbaseEW	10GbaseLX4
Medium	Dva optička vlakna Multimodna na 850 nm 64B66B kod	Dva optička vlakna Monomodna na 1310 nm 64B66B	Dva optička vlakna Monomodna na 1550 nm SONET kompatibilna	Dva optička vlakna multimodna/monomodna sa četiri talasne dužine na 1310 nm opsegu 8B10B kod
Maksimalna veličina segmenta	300 m	10 km	40 km	300 m - 10 km

- ❑ Zadržana struktura frejma
- ❑ CSMA-CD protokol zvanično napušten
- ❑ LAN fizički nivo za primjenu u lokalnim mrežama
- ❑ WAN fizički nivo za primjenu korišćenjem SONET OC-192c
- ❑ Intenzivna primjena u gradskim mrežama

40GEthernet i 100GEthernet

- ❑ IEEE 802.3-15
- ❑ Identičan format Ethernet frejma kao kod prethodnih verzija
- ❑ Identična minimalna i maksimalna veličina Ethernet frejma
- ❑ BER na MAC podnivou manji od 10^{-12}
- ❑ Podrška za OTN (optičke transportne mreže)
- ❑ Brzine prenosa na MAC podnivou od 40 i 100Gb/s

Physical layer	40 Gigabit Ethernet	100 Gigabit Ethernet
Backplane		100GBASE-KP4
Improved Backplane	40GBASE-KR4	100GBASE-KR4
7 m over twinax copper cable	40GBASE-CR4	100GBASE-CR10 100GBASE-CR4
30 m over "Cat.8" twisted pair	40GBASE-T	
100 m over OM3 MMF	40GBASE-SR4	100GBASE-SR10
125 m over OM4 MMF ^[18]		100GBASE-SR4
2 km over SMF, serial	40GBASE-FR	100GBASE-CWDM4 ^[21]
10 km over SMF	40GBASE-LR4	100GBASE-LR4
40 km over SMF	40GBASE-ER4	100GBASE-ER4

200GEthernet i 400GEthernet

- ❑ IEEE Std 802.3bs™-2017
- ❑ Pripadaju Terabit Ethernet grupi standarda
- ❑ Data centar
- ❑ Podrška za OTN (optičke transportne mreže)
- ❑ Ultra HDTV
- ❑ Identičan format Ethernet frejma kao kod prethodnih verzija
- ❑ Identična minimalna i maksimalna veličina Ethernet frejma

200GbE Interf.	Transmission	Media	Distance
200GBase-SR8	8 x 25 Gbps	8 MMF	100 m
200GBase-DR4	4 x 50 Gbps	4 SMF	500 m
200GBase-FR4	4 x 50 Gbps	4 SMF, CWDM	2 km
200GBase-LR4	4 x 50 Gbps	4 SMF, CWDM	10 km

Port Type	Reach
400GBASE-SR16	At least 100m MMF
400GBASE-DR4	At least 500m SMF
400GBASE-FR8	At least 2km SMF
400GBASE-LR8	At least 10km SMF

Nivo linka

- ❑ Uvod, servisi
- ❑ Detekcija i korekcija greške
- ❑ Protokoli višestrukog pristupa
- ❑ LAN
 - MAC adresiranje
 - Ethernet
 - Switch
 - VLAN
- ❑ WiFi
- ❑ 4G
- ❑ Mreža data centra

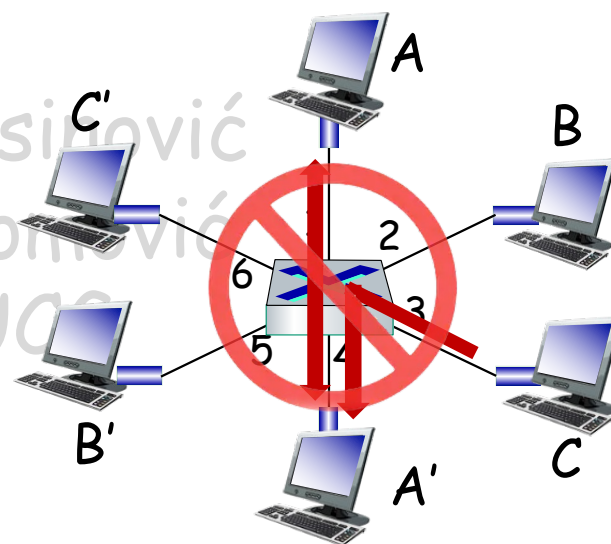
Igor Radusinović
Slavica Tomović
ETF, UCG

Ethernet switch

- ❑ Uređaj nivoa linka
 - Prihvata i prosleđuje Ethernet frejmove
 - Ispituje zaglavlje frejma i selektivno prosleđuje frejm na bazi MAC destinacione adrese
 - Kada se frejm prosleđuje na lokalnu mrežu, koristi se CSMA/CD za pristup lokalnoj mreži
- ❑ Transparento
 - Hostovi ne osjećaju prisustvo switch-e-va
- ❑ *Plug-and-play*, samouki
 - Switch-evi ne moraju da se konfigurišu

Switch: više istovremenih prenosa

- ❑ Hostovi su direktno povezani na *switch*
- ❑ Switchevi baferuju frejmove
- ❑ Ethernet protokol se koristi na interfejsima ali nema kolizije zbog *full duplex* prenosa
 - Svaki link je poseban kolizijski domen
- ❑ *komutacija*: od A do A' i od B do B' se prenos obavlja simultano bez kolizija
 - Prenos od A do A' i od C do A' ne može biti simultan



switch sa 6
interfejsa
(1,2,3,4,5,6)

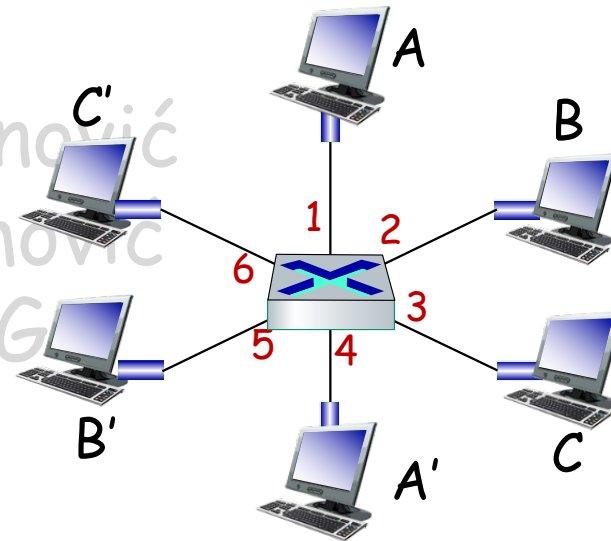
Tabela prosleđivanja switch-a

Kako switch zna da se A' može doseći preko interfejsa 4, a B' preko interfejsa 5?

- Svaki switch ima tabelu prosleđivanja, koja sadrži:
 - (MAC adresu hosta, identifikator interfejsa preko kojeg se može doseći, time stamp)
 - Liči na tabelu rutiranja!

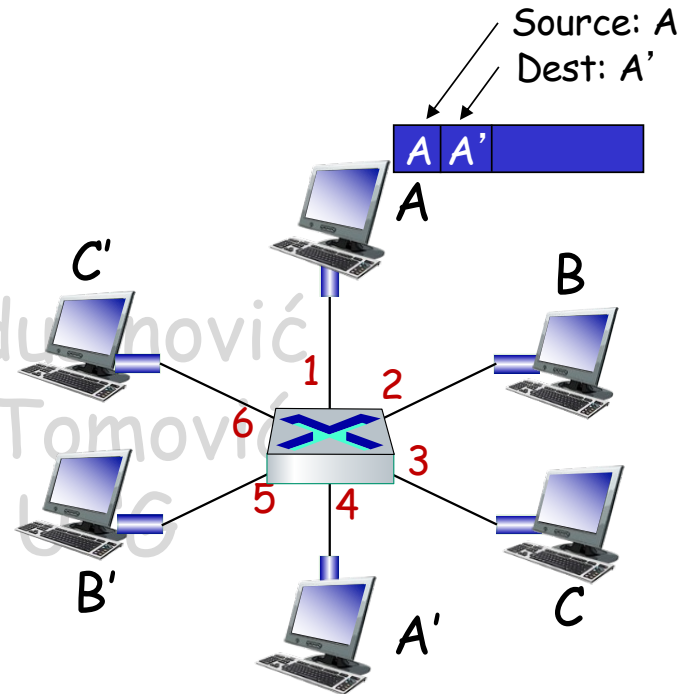
Kako se kreira ova tabela?

- Nešto slično protokolu rutiranja?



Switch: self-learning

- switch *uči* koji hostovi se mogu doseći preko kojih interfejsa
 - Kada frejm stigne, switch “nauči” lokaciju pošiljaoca
 - Upisuje par pošiljalac/lokacija u tabelu



MAC addr	interface	TTL
A	1	60

*Tabela
(inicijalno prazna)*

Switch: filtriranje/prosleđivanje frejma

Kada switch primi frejm:

Indeksira tabelu prosleđivanja koristeći MAC destinacionu adresu

if je sadržaj pronađen za destinaciju

then{

if destinacija na mreži sa koje je došao frejm

then odbaci frejm

else proslijedi frejm na odgovarajući interfejs

}

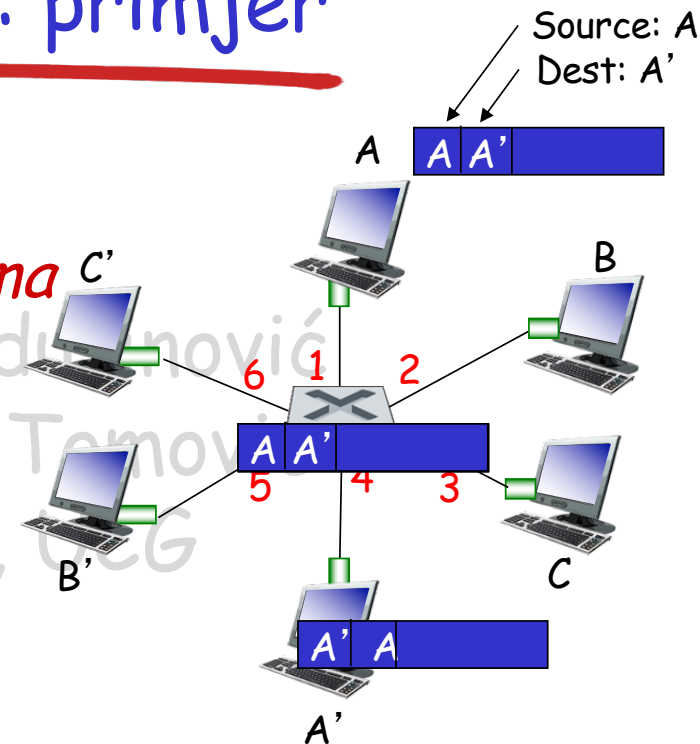
else šalji na sve interfejse, osim na onaj odakle je frejm stigao

Self-learning, prosleđivanje: primjer

❑ Destinacija frejma, A', nepoznata:

❑ Destinacija frejma poznata

Šalji svima
A:
selektivno šalji na jedan link

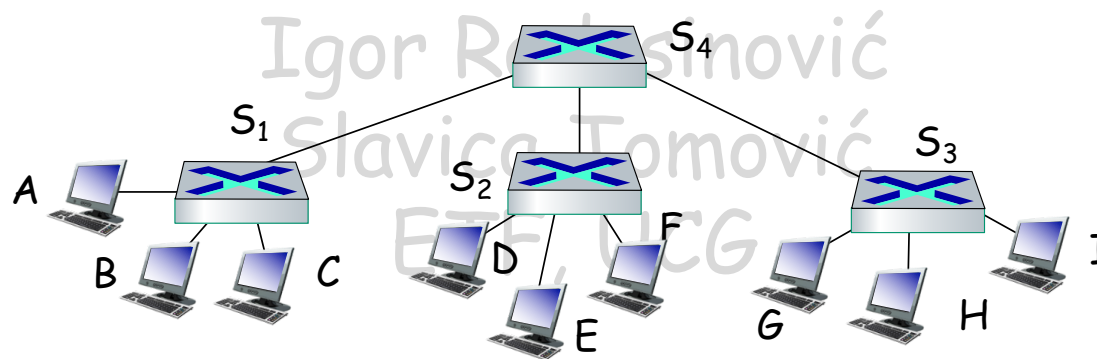


MAC adr.	interfejs	TTL
A	1	60
A'	4	60

Tabela

Povezivanje switcheva

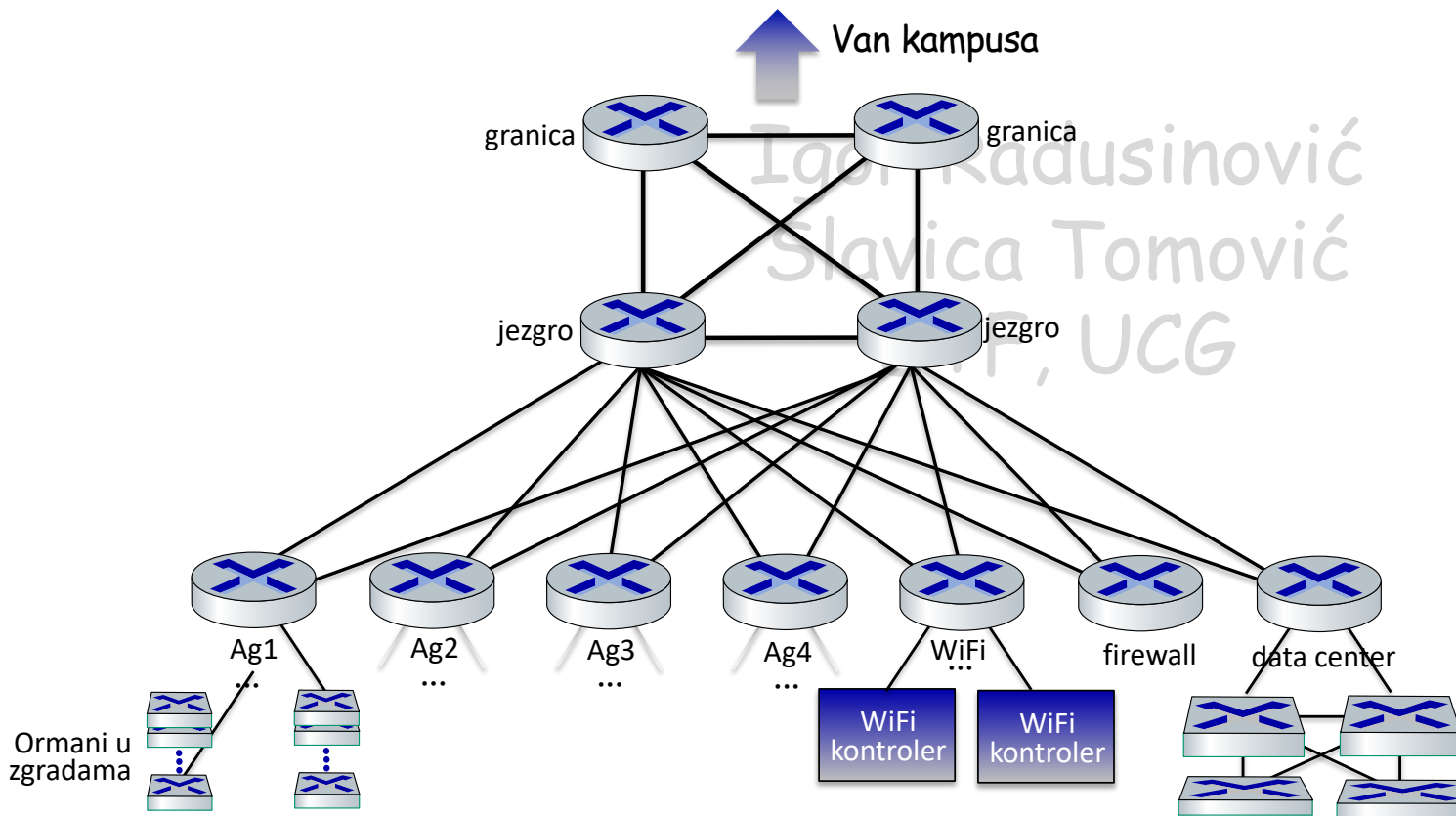
- *Switch*-evi se povezuju u mreže koje imaju topologiju stablo



Slanje od A do G - kako S₁ zna da proslijedi frejm adresiran za G preko S₄ i S₃?

- *Self learning!* (na isti način kao za jedan switch!)

UMass mreža kampusa

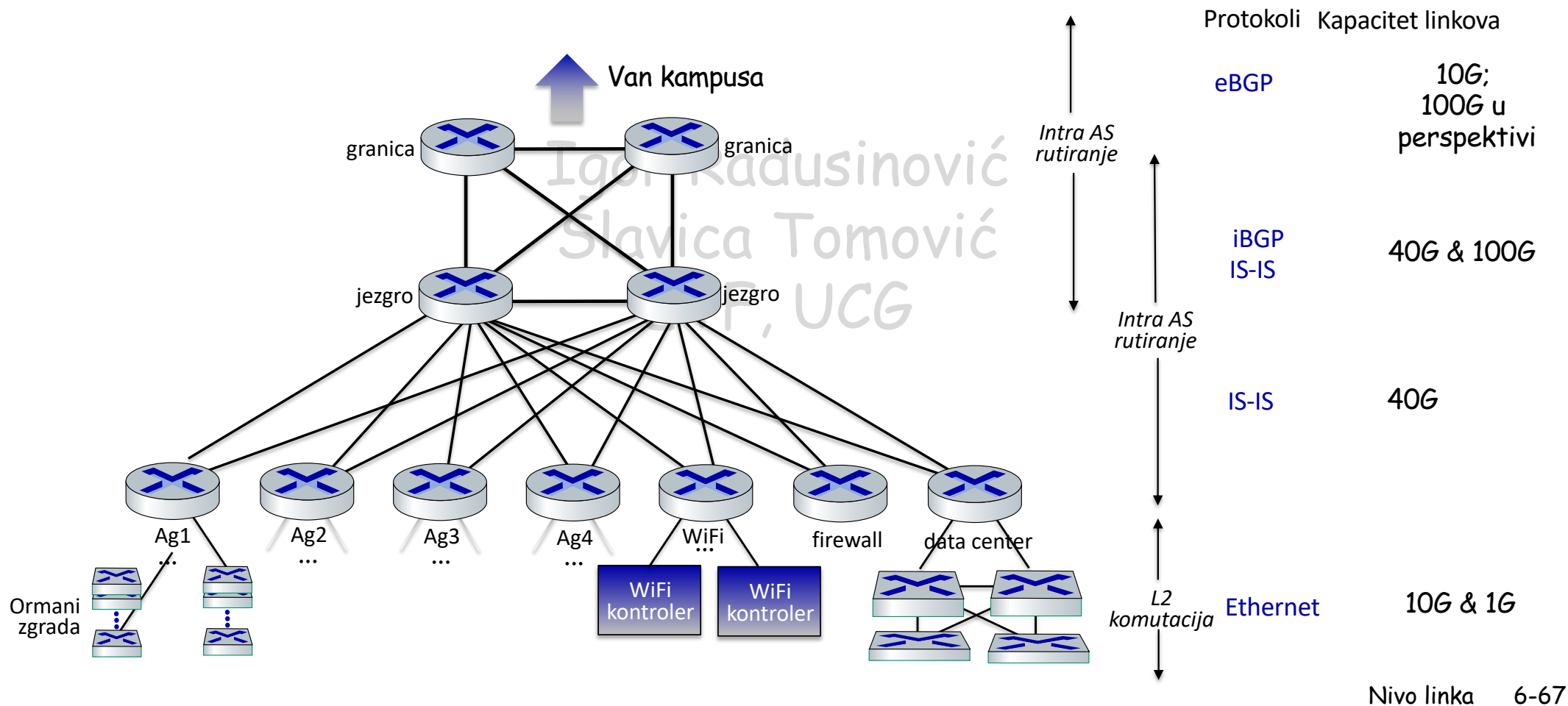


UMass mreža:

- 4 firewall-a
- 10 rutera
- 2000+ switch-eva
- 6000 *wireless access point-a*
- 30000 *aktivnih žičnih priključaka*
- 55000 *aktivnih bežičnih uređaja*

... ~15 ljudi,
napravilo,
održava i
razvija

UMass mreža kampusa



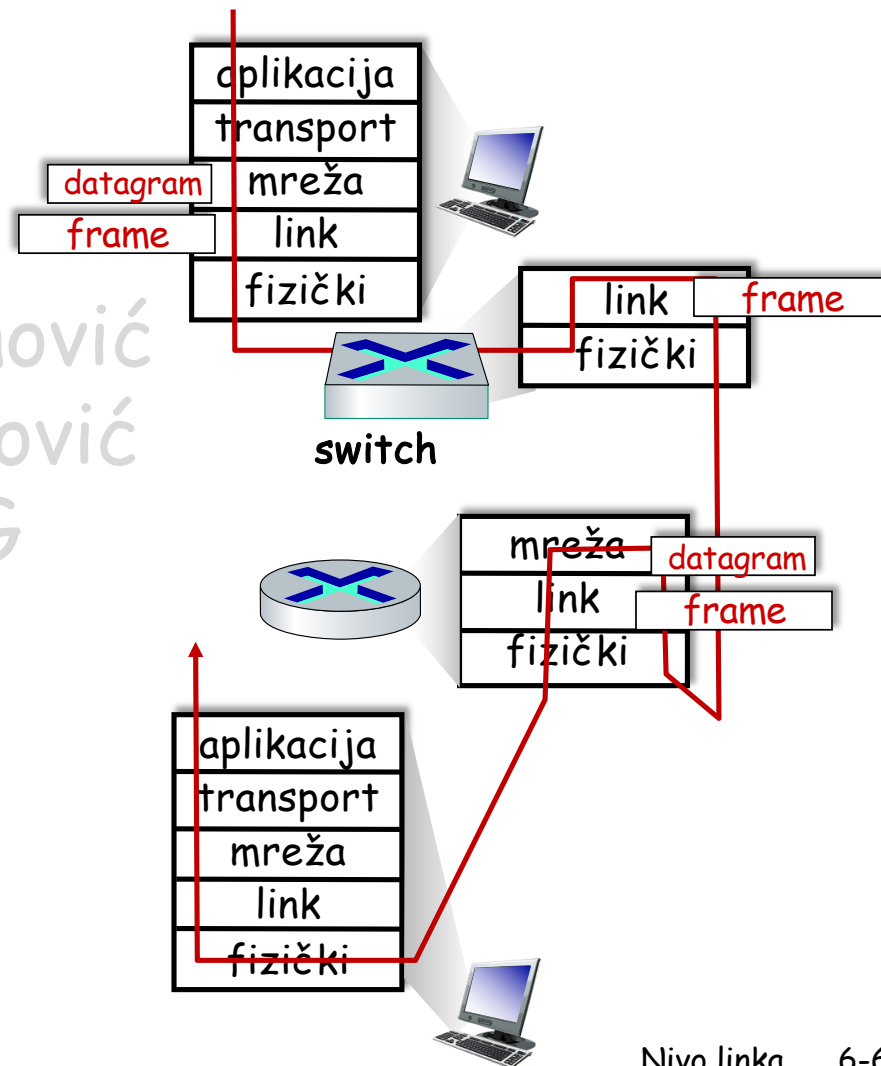
Switch i ruter

Oba su komutatori paketa:

- **ruter**: uređaj nivoa mreže (ispituje zaglavlje nivoa mreže)
- **switch**: uređaj nivoa linka (ispituje zaglavlje nivoa linka)

Posjeduju tabelu prosleđivanja:

- **ruter**: određuje tabelu na bazi algoritama rutiranja
- **switch**: sam "uči" tabelu

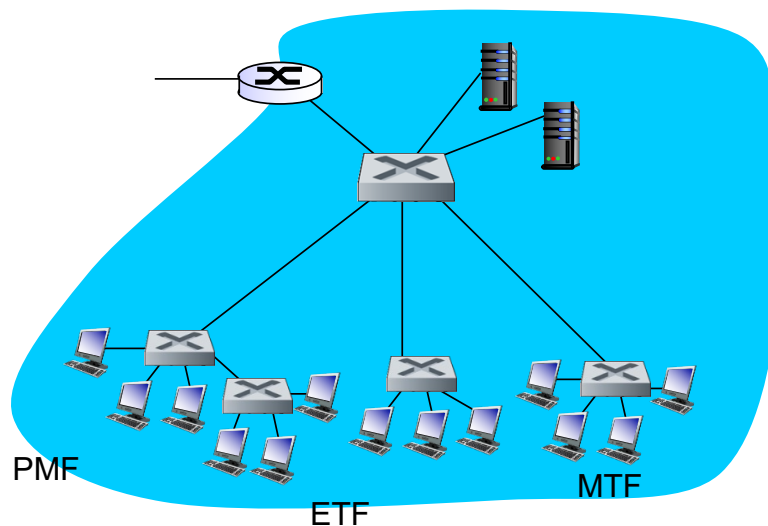


Nivo linka

- ❑ Uvod, servisi
- ❑ Detekcija i korekcija greške
- ❑ Protokoli višestrukog pristupa
- ❑ LAN
 - MAC adresiranje
 - Ethernet
 - Switch
 - VLAN
- ❑ WiFi
- ❑ 4G
- ❑ Mreža data centra

Igor Radusinović
Slavica Tomović
ETF, UCG

VLAN: motivacija



PMF korisnik pređe na ETF, ali želi da se poveže na PMF switch?

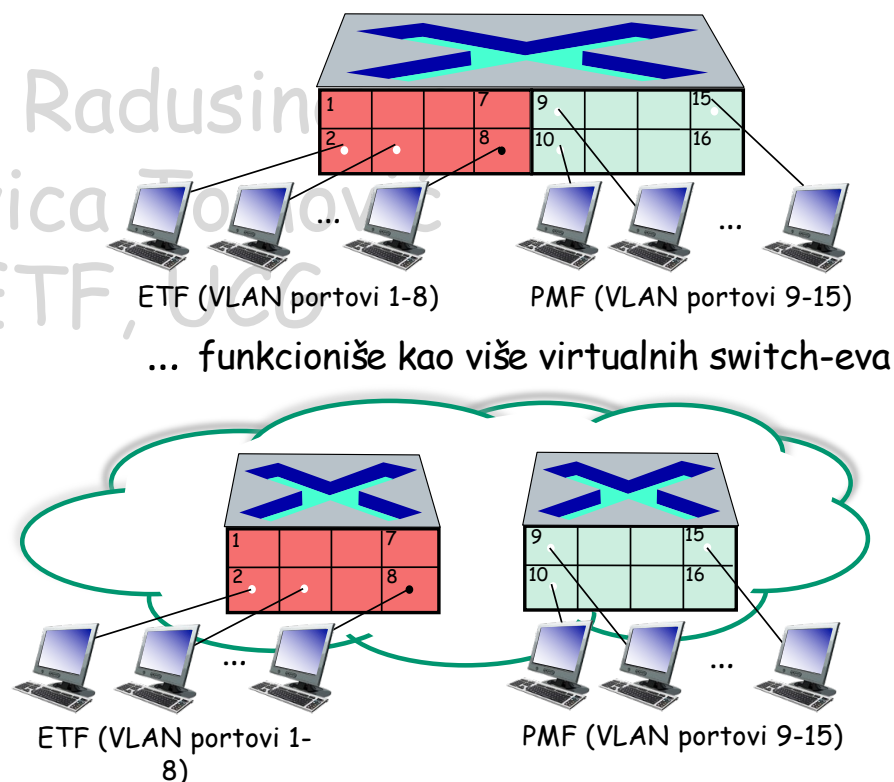
- jedan broadcast domen:
 - Kompletan broadcast drugog nivoa (ARP, DHCP) se prenosi preko LAN-a)
 - sigurnost/privatnost, efikasnost,...

VLAN

Virtual Local Area Network

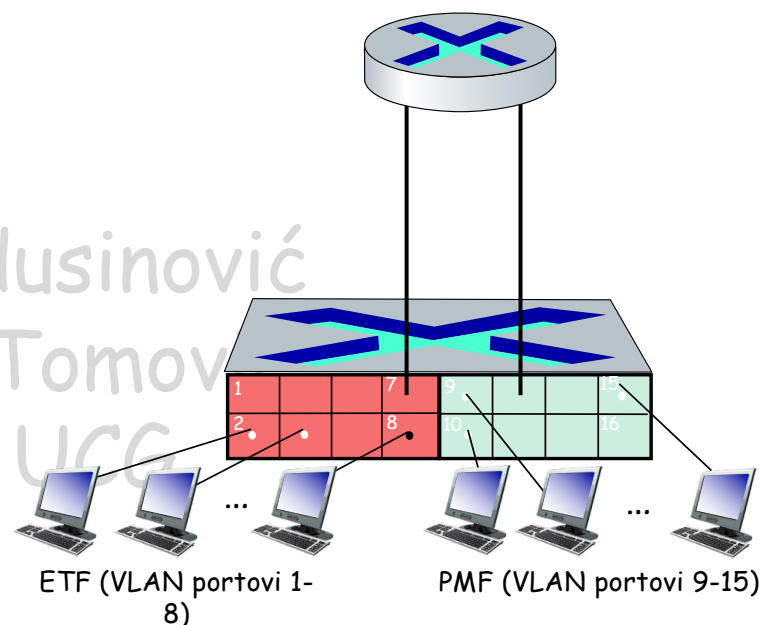
Switch(evi) koji podržavaju VLAN mogu definisati više virtuelnih LAN-ova preko jedne fizičke LAN infrastrukture.

Port-bazirani VLAN: portovi switch-a su grupisani (korišćenje softvera za upravljanje switch-em) tako da *jedan* switch

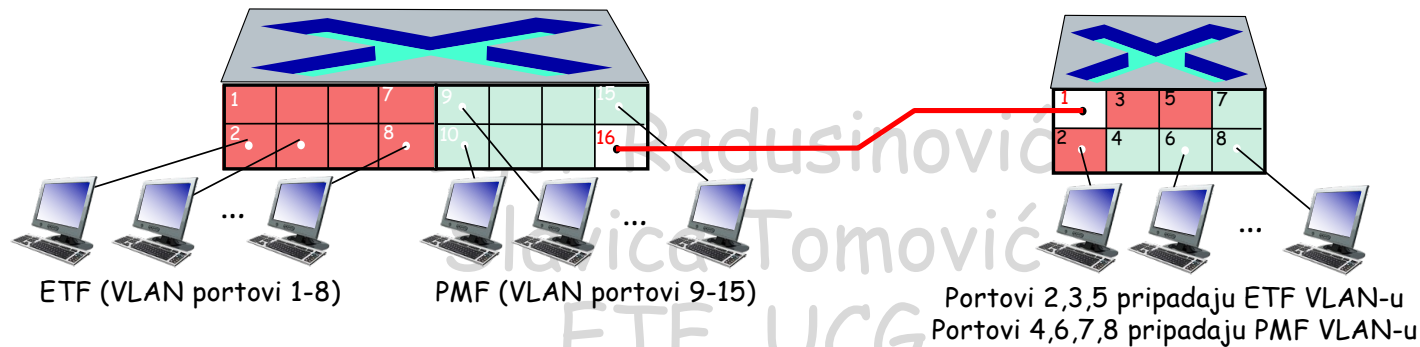


Port bazirani VLAN

- ❑ *Izolacija saobraćaja*: frejmovi od/do portova 1-8 mogu doseći samo portove 1-8
 - Postoji i VLAN baziran na MAC adresama
- ❑ *Dinamička pripadnost*: portovi se dinamički mogu dodjeljivati VLANovima
- ❑ *Prosleđivanje između VLAN-ova*: preko rutera (baš kao komutatori iz različitih mreža)
 - L3 komutator

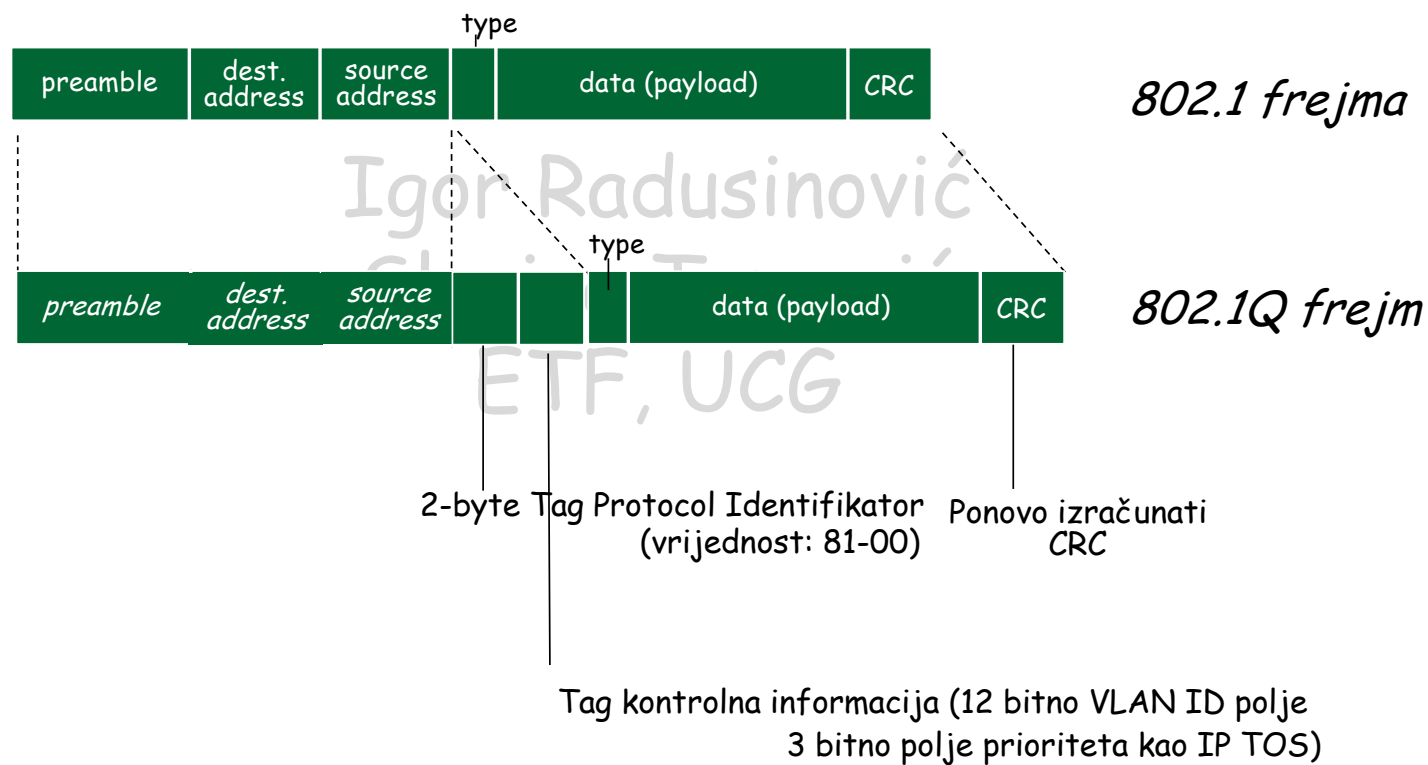


VLAN preko više switch-eva



- *trunk port*: prenosi frejmove između VLAN-ova definisanih na više switch-eva
 - Frejmovi jednog VLAN-a koji se prenose između switch-eva moraju nositi VLAN identifikator
 - 802.1q protokol dodaje i uklanja dodatna polja u zaglavlju frejma koji se prenose preko trunk portova

802.1Q VLAN format frejma



Nivo linka

- ❑ Uvod, servisi
- ❑ Detekcija i korekcija greške
- ❑ Protokoli višestrukog pristupa
- ❑ LAN
 - MAC adresiranje
 - Ethernet
 - Switch
 - VLAN
- ❑ WiFi
- ❑ 4G
- ❑ Mreža data centra

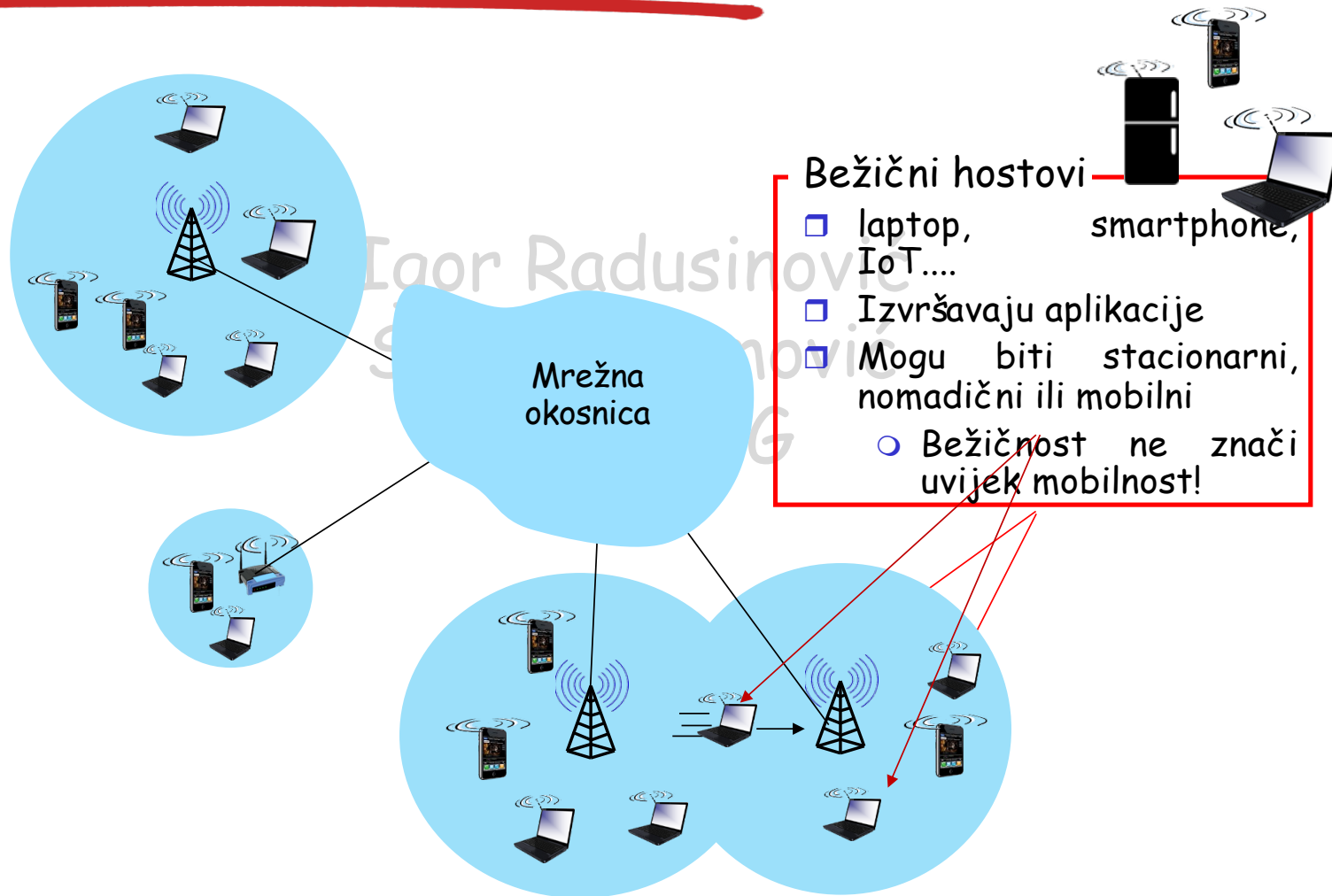
Igor Radusinović
Slavica Tomović
ETF, UCG

WiFi

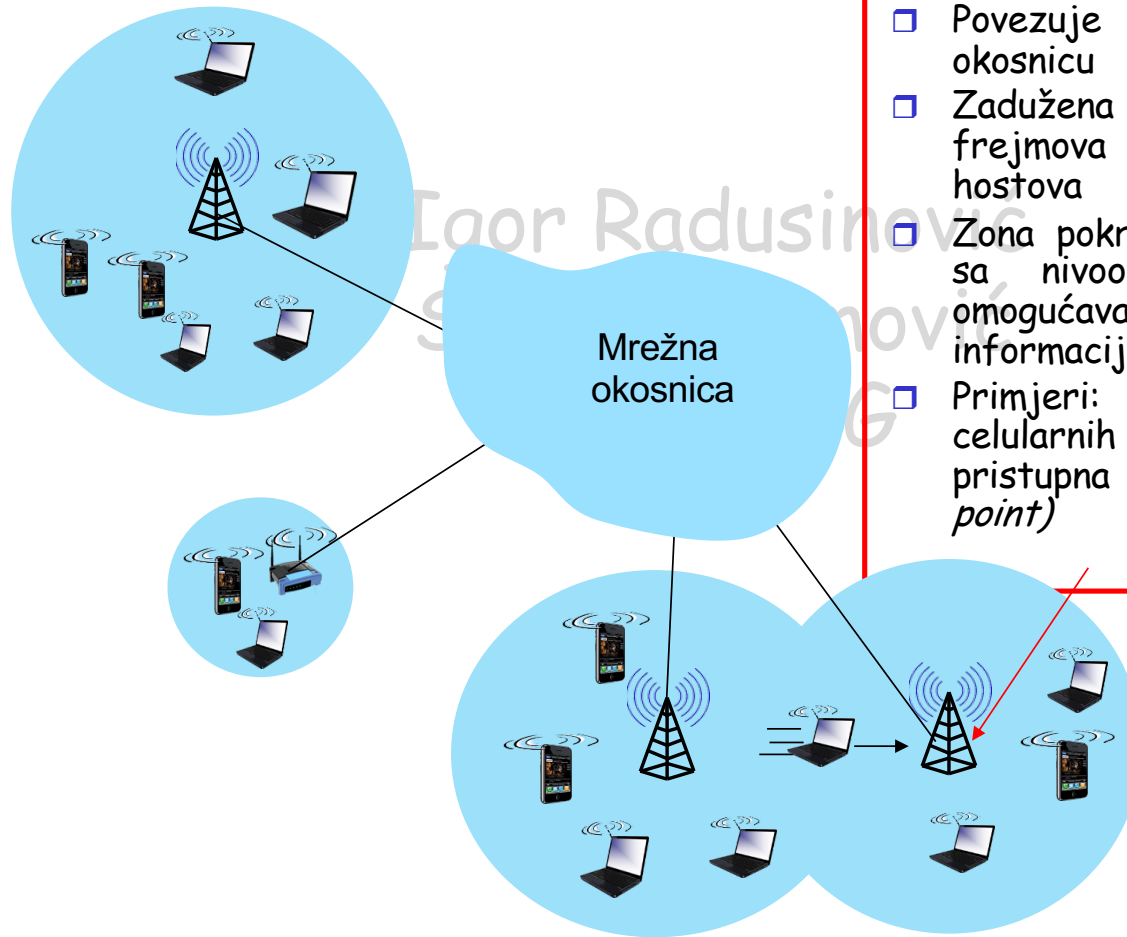
Motivacija:

- ❑ Zainteresovanost korisnika za pristup Internetu bilo gdje i bilo kada!
- ❑ Postići približne brzine prenosa i nivoa kašnjenja u bežičnom pristupu kao kod žičnog pristupa
- ❑ Podržati što je veću moguću pokretljivost uz veliku brzinu prenosa.
- ❑ Obzirom na veliku zainteresovanost tržišta primijeniti trenutno najmodernija i najbolja tehnološka rješenja.

Elementi bežične računarske mreže



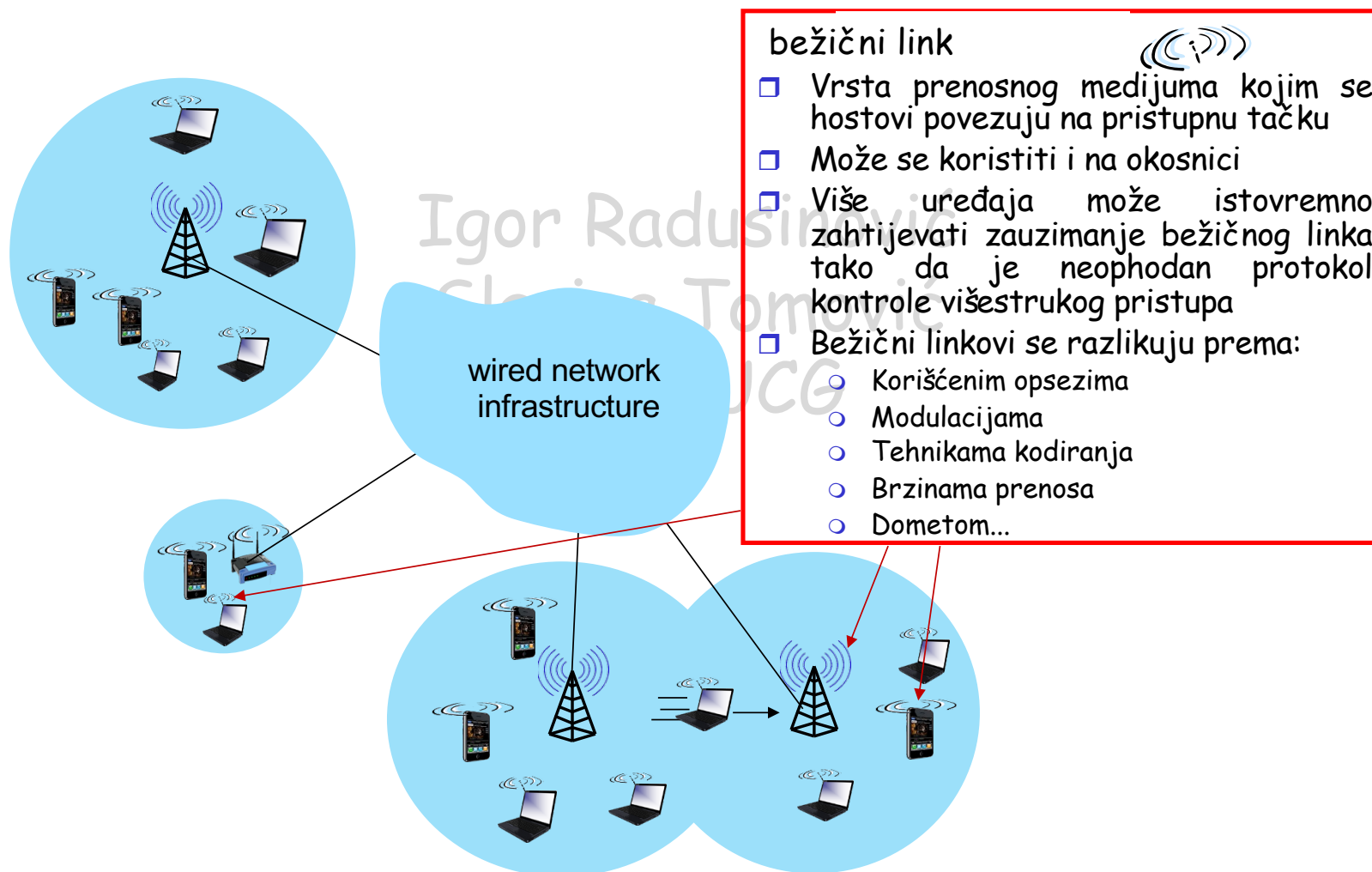
Elementi bežične mreže



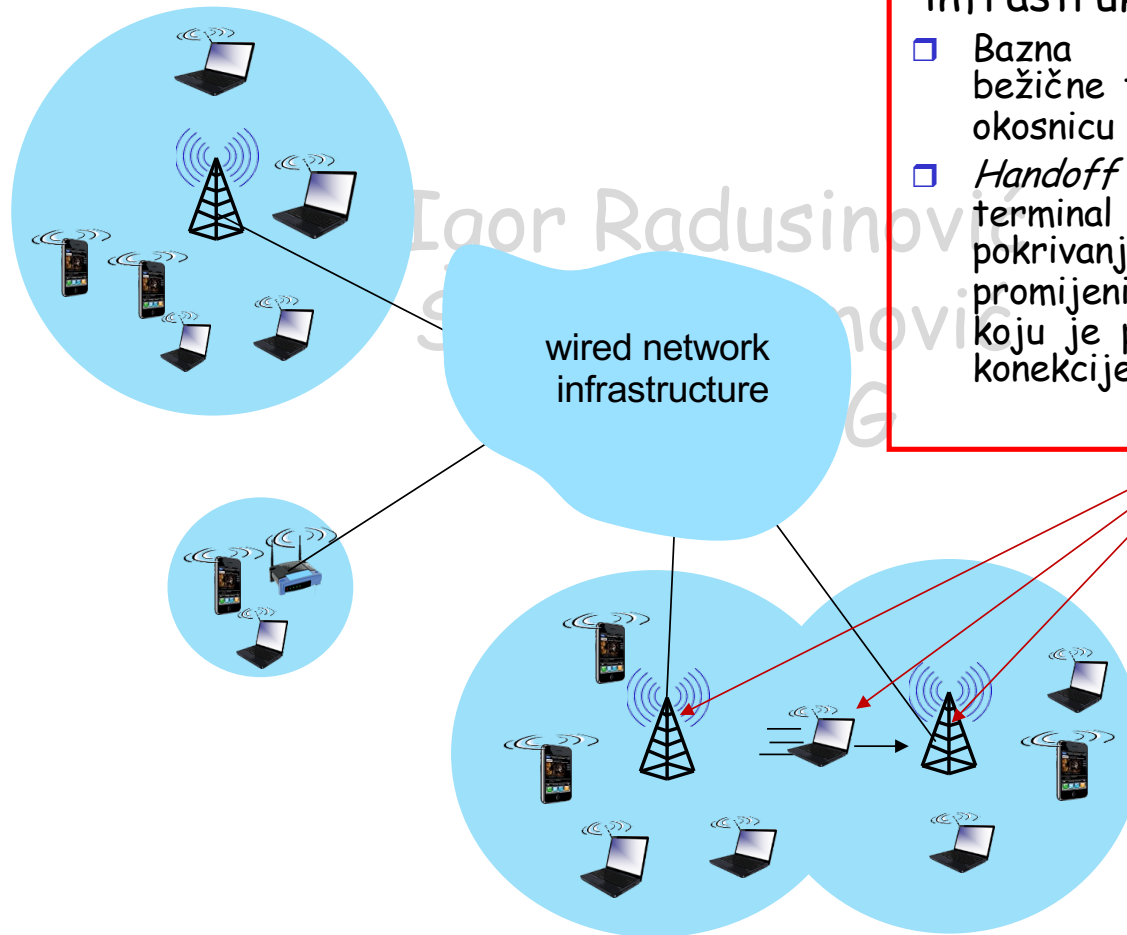
bazna stanica

- Povezuje se na mrežnu okosnicu
- Zadružena za slanje i prijem frejmova ka i od bežičnih hostova
- Zona pokrivanja je prostor sa nivoom signala koji omogućava uspješan prijem informacije
- Primjeri: bazne stanice celularnih mreža, 802.11 pristupna tačka (*access point*)

Elementi bežične računarske mreže



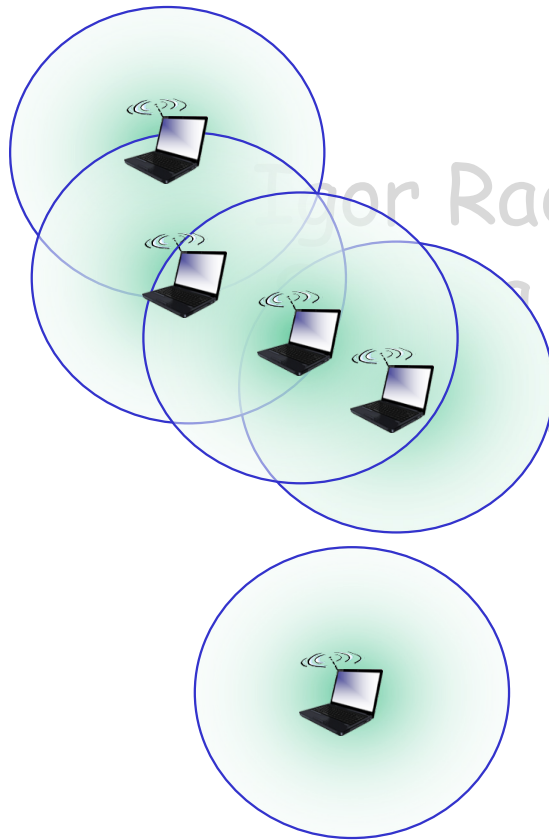
Elementi bežične mreže



infrastrukturni mod

- Bazna stanica povezuje bežične terminale na mrežnu okosnicu
- *Handoff (handover)*: mobilni terminal koji napušta zonu pokrivanja bazne stanice mora promijeniti baznu stanicu na koju je povezan bez prekida konekcije

Elementi bežične mreže



ad hoc mod

- Nema baznih stanica
- Čvorišta mogu prenositi frejmove samo do drugih čvorišta koji su u zoni pokrivanja
- Čvorišta se samoorganizuju u mrežu

Elementi bežične mreže

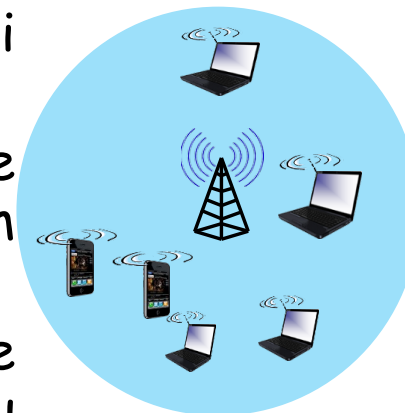
	jedan hop	multiple hop-ovi
infrastrukturne (npr, AP)	host se povezuje na baznu stanicu (WiFi, celularnu) koja ga povezuje na mrežnu okosnicu	Host se često mora preko više čvorišta povezati na okosnicu: <i>mesh</i> mreža
bez infrastrukture	nema bazne stanice, nema konekcije na mrežnu okosnicu (Bluetooth, ad hoc mreže)	Nekada mora da se poveže preko više čvorišta da bi dosegao željeni čvor. MANET, VANET

Karakteristike bežičnog linka (1)

Razlikuje se od žičnog linka

- Slabljenje nivoa signala: radio signal više slabi tokom prostiranja (gubitak uslijed propagacije)
- Interferencija sa drugim izvorima: frekvencije dijele bežični terminali između sebe ili sa drugim uređajima
- Multipath propagacija: radio signal se reflektuje od zemlje i objekata tako da u istu tačku dolazi u različitim trenucima

Projektovanje bežičnih linkova i zona pokrivanja je izuzetno komplikovano!!!!!!!!!!!!!!

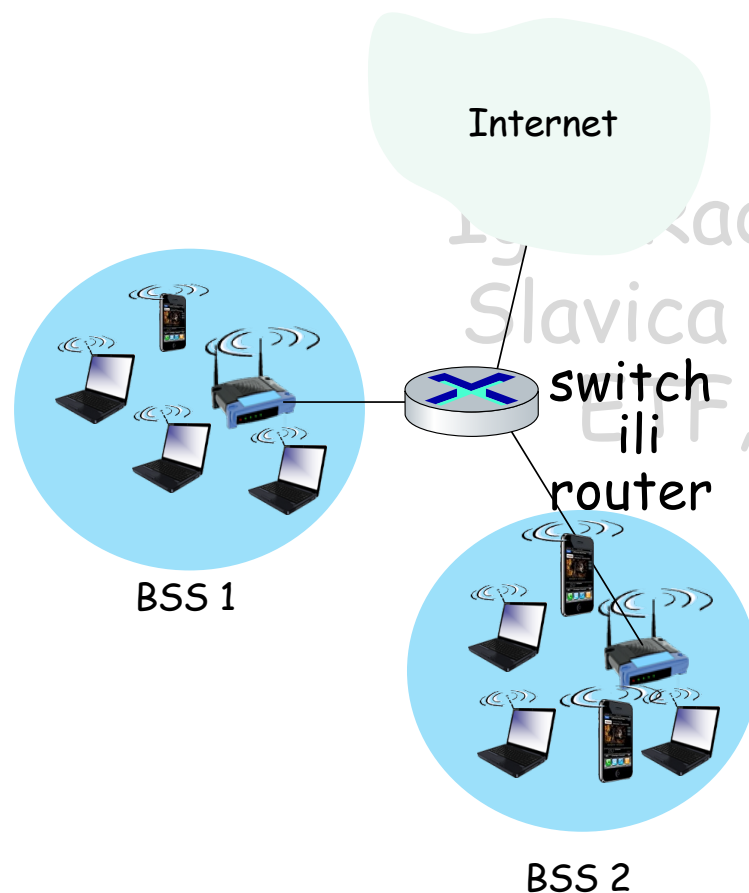


IEEE 802.11 Wireless LAN (WLAN,WiFi) standardi

IEEE 802.11 standard	Godina	Maksimalna brzina	Domet	Frekvencijski opseg
802.11b	1999	11 Mb/s	30 m	2.4 GHz
802.11g	2003	54 Mb/s	30m	2.4 GHz
802.11n (WiFi 4)	2009	600 Mb/s	70m	2.4 i 5 GHz
802.11ac (WiFi 5)	2013	3.47Gb/s	70m	5 GHz
802.11ax (WiFi 6)	2020 (exp.)	14 Gb/s	70m	2.4, 5 GHz
802.11af	2014	35 - 560 Mb/s	1 Km	oslobodeni TV opsezi (54-790 MHz)
802.11ah	2017	347Mb/s	1 Km	900 MHz

- ❑ Svi koriste CSMA/CA tehniku za kontrolu višestrukog pristupa
- ❑ Infrastrukturni ili ad-hoc mod

802.11 LAN arhitektura



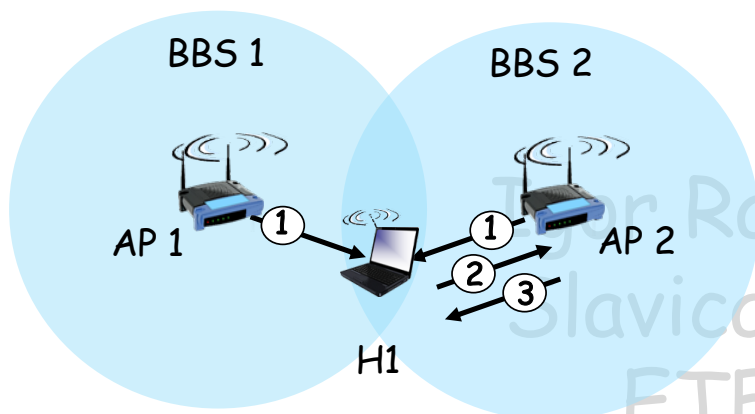
- Bežični host komunicira sa baznom stanicom
 - Bazna stanica = access point (AP)
- Basic Service Set (BSS) (ili “cell”) u infrastrukturnom modu sadrži:
 - Bežične hostove
 - access point (AP)
- ad hoc mod sadrži samo hostove

802.11 kanali

- ❑ Spektar je podijeljen na kanale različitih frekvencija
 - Administrator AP bira frekvenciju na kojoj će raditi AP
 - Moguća je interferencija zato što kanal već može biti izabran na susjednoj AP
- ❑ Host se mora povezati na AP
 - Skenira kanale, tražeći *beacon* frejmove koji sadrže ime AP (SSID) i njegovu MAC adresu
 - bira AP na koji će se povezati
 - Može se obaviti autentifikacija
 - Pokreće DHCP kako bi dobio IP adresu

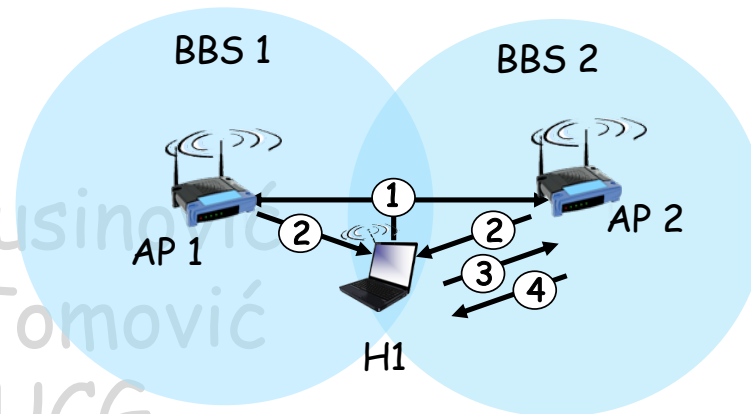


802.11: pasivno/aktivno skeniranje



Pasivno skeniranje:

- (1) AP šalje *beacon* frejmove
- (2) Host šalje *Association Request* frejm izabranom AP
- (3) AP šalje *Association Response* frejm odgovarajućem hostu

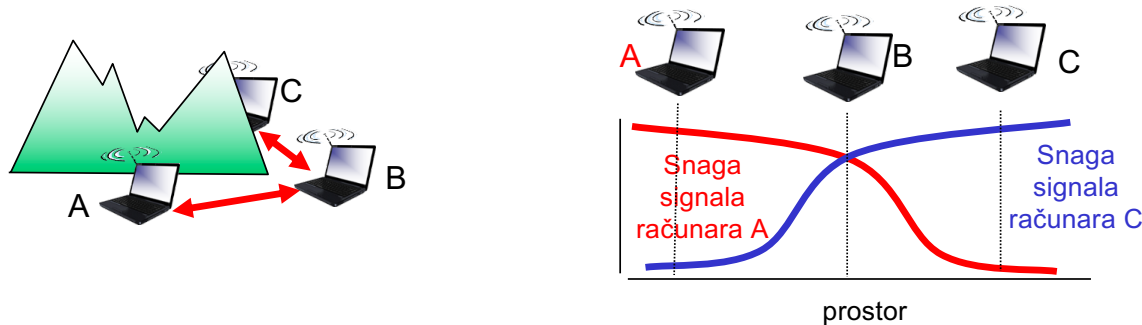


Aktivno skeniranje:

- (1) Host šalje *Probe Request* frejm svim prisutnim AP
- (2) AP šalju *Probes response* frejm
- (3) Host šalje izabranom AP *Association Request* frejm
- (4) Izabrani AP šalje *Association Response* frejm hostu

IEEE 802.11: višestruki pristup

- ❑ izbjegavanje kolizije koja nastaje kada 2 i više čvorišta emituju
- ❑ 802.11: CSMA - osluškivanje prije slanja
 - Nema kolizije sa komunikacijom koja je u toku
- ❑ 802.11: *nema detekcije kolizije*
 - Teško je detektovati koliziju prilikom emitovanja zbog
 - niskog nivoa prijemnog signala
 - sakrivenog terminala
 - Cilj je pokušati izbjeći koliziju (*avoid collisions*) CSMA/C(ollision)A(voidance)



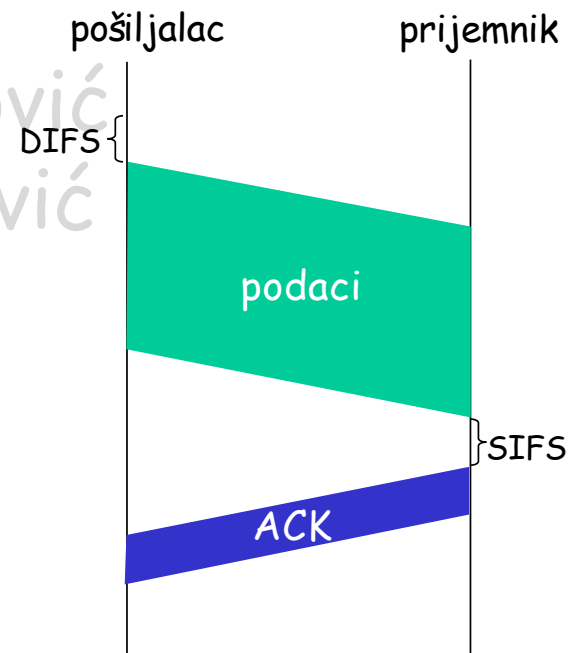
IEEE 802.11 MAC Protokol: CSMA/CA

802.11 pošiljalac

1. ako pošiljalac detektuje slobodan kanal tokom trajanja intervala **DIFS** (*Distributed Interframe Space*) tada se šalje cijeli frejm (nema detekcije kolizije)
2. ako se tokom DIFS detektuje zauzeti kanal tada se
 - Izračunava slučajno *backoff* vrijeme tajmera
 - Dok je kanal zauzet tajmer se zaustavlja
 - Nakon oslobađanja kanala timer odbrojava
 - Kada istekne tajmer, ako je kanal slobodan počinje slanje frejma
 - Ako nakon slanja nema potvrde ACK, povećava se slučajni backoff interval, i ponavlja se korak 2

802.11 prijemnik

- Ako je primljeni frejm ispravan
 - šalje ACK poslije isteka **SIFS** (*Short Interframe Space*)
 - ACK je potreban zbog problema skriveni terminal
- Ako primljeni frejm nije ispravan prijemnik odbacuje frejm



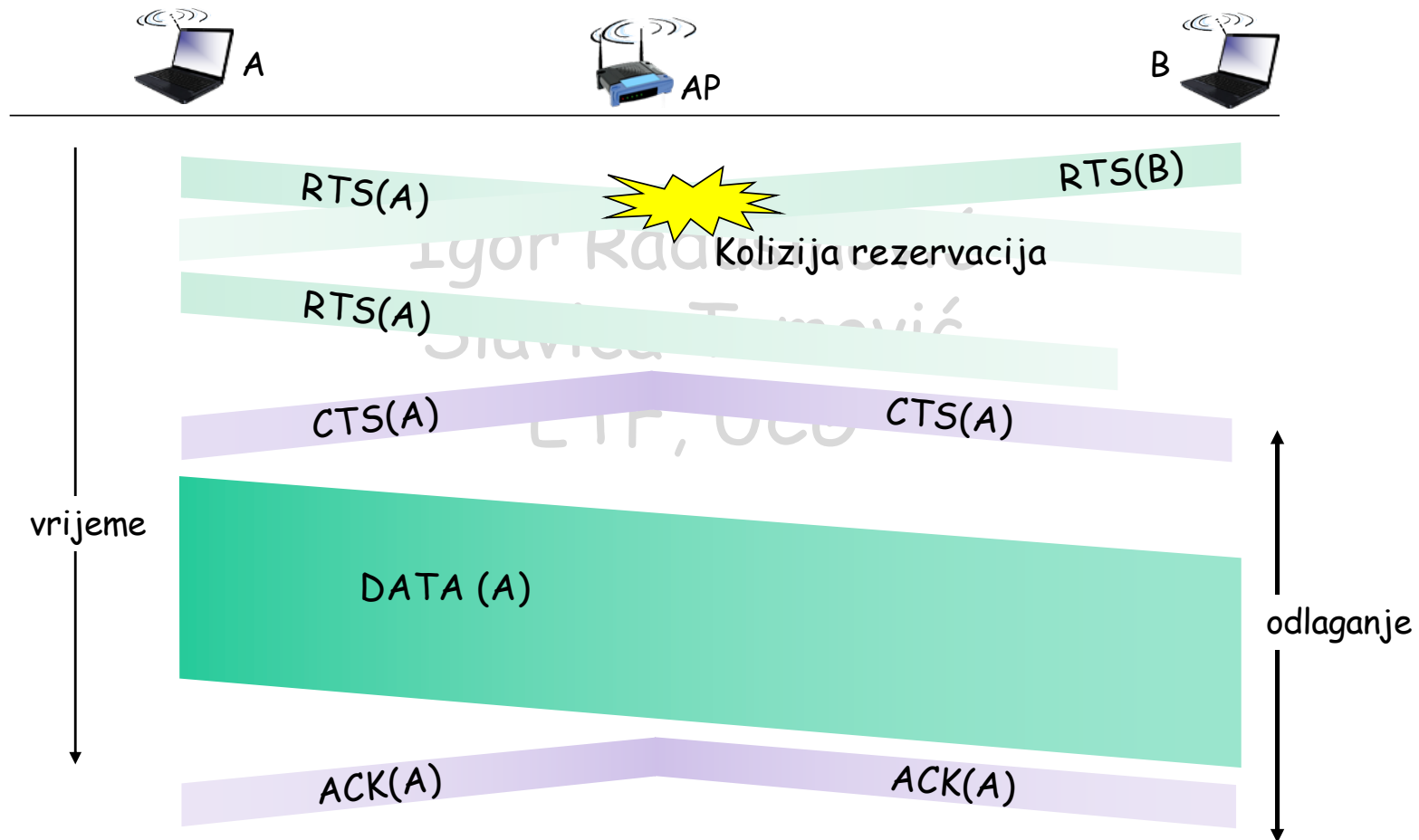
Izbjegavanje kolizije (više)

IDEJA! dozvoliti korisniku da “rezerviše” kanal duže nego što mu je potrebno za slanje jednog frejma: izbjeći kolizije za velike frejmove

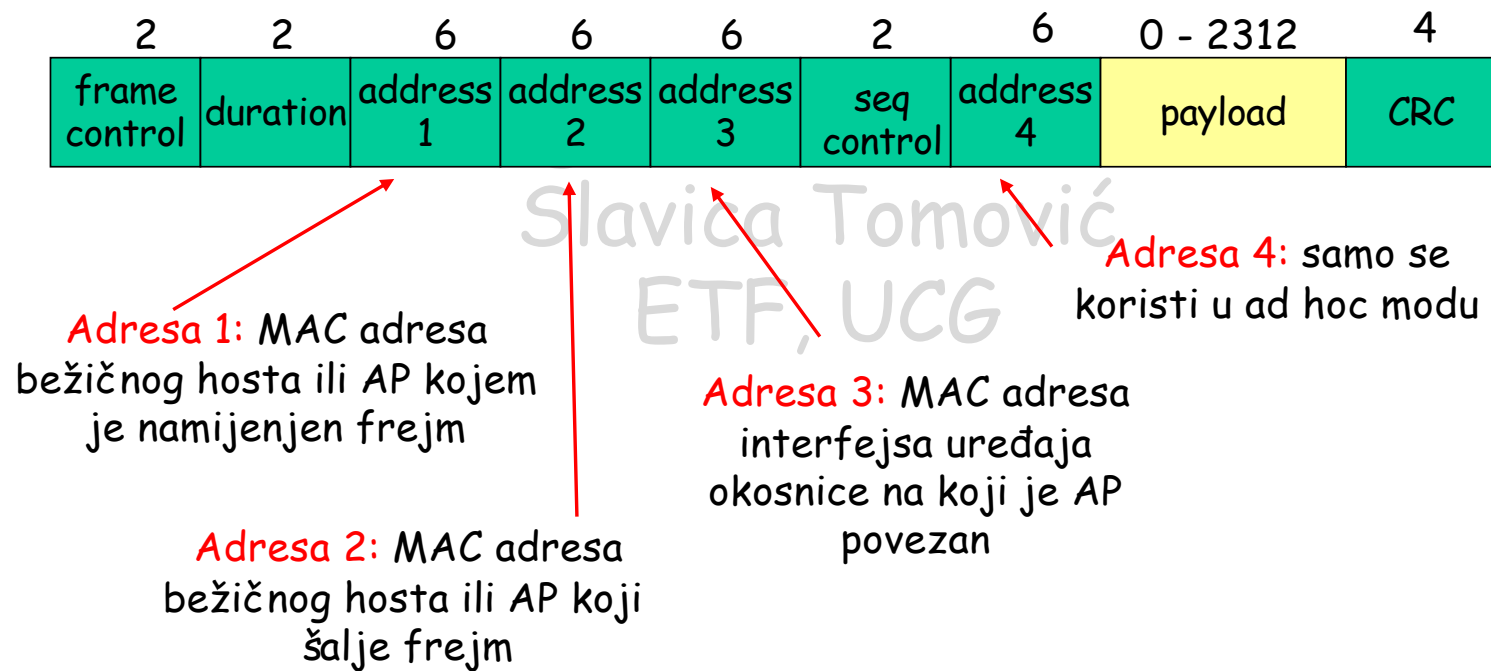
- ❑ Pošiljalac prvo šalje mali *request-to-send* (RTS) frejm pristupnoj tački korišćenjem CSMA
 - RTS frejmovi mogu zapasti u koliziju sa drugim frejmovima (što nije veliki problem jer su kratki)
- ❑ Pristupna tačka šalje svima *clear-to-send* CTS frejm kao odgovor na RTS frejmove
- ❑ CTS frejm primaju sva čvorišta ali ga koristi samo onaj pošiljalac kojemu je namijenjen
 - Pošiljalac počinje slanje frejma sa podacima
 - Druge stanice ne šalju

Korišćenjem malih rezervacionih frejmova
izbjegava se kolizija velikih frejmova !

Izbjegavanje kolizije: razmjena RTS-CTS

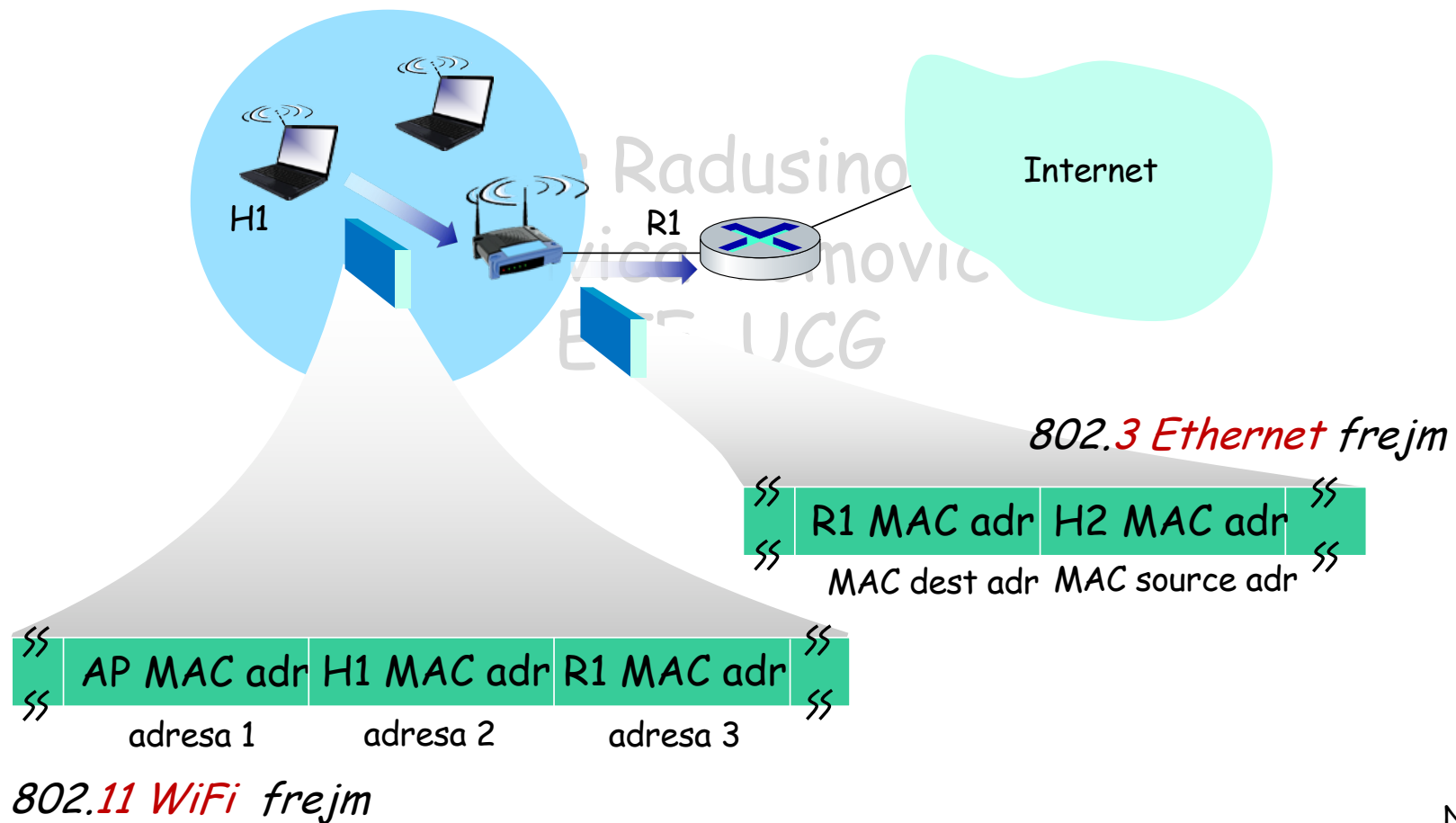


802.11 frejm: adresiranje

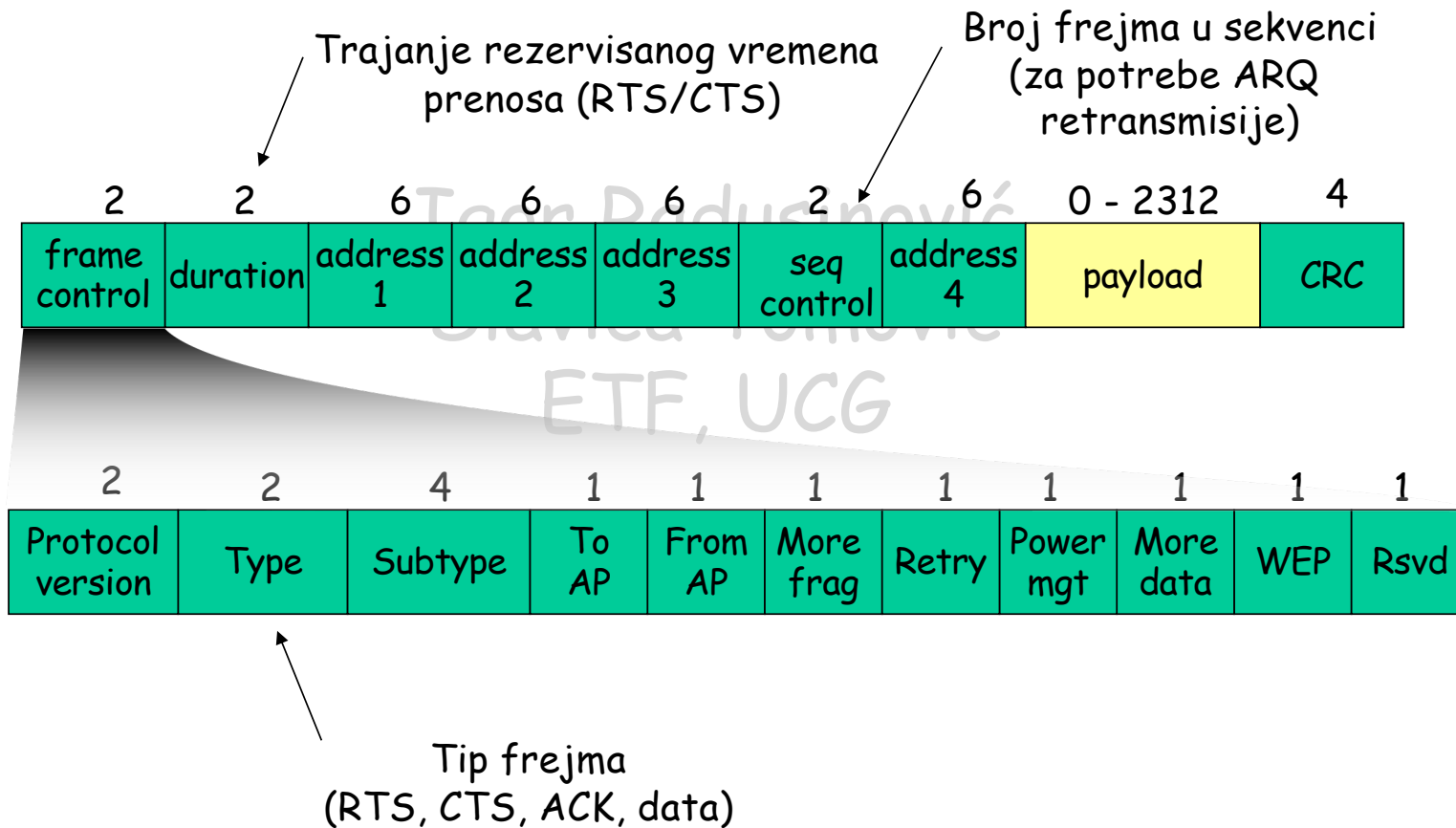


Payload je najčešće 1500B koji nosi IP datagram ili ARP paket.

802.11 frejm: adresiranje

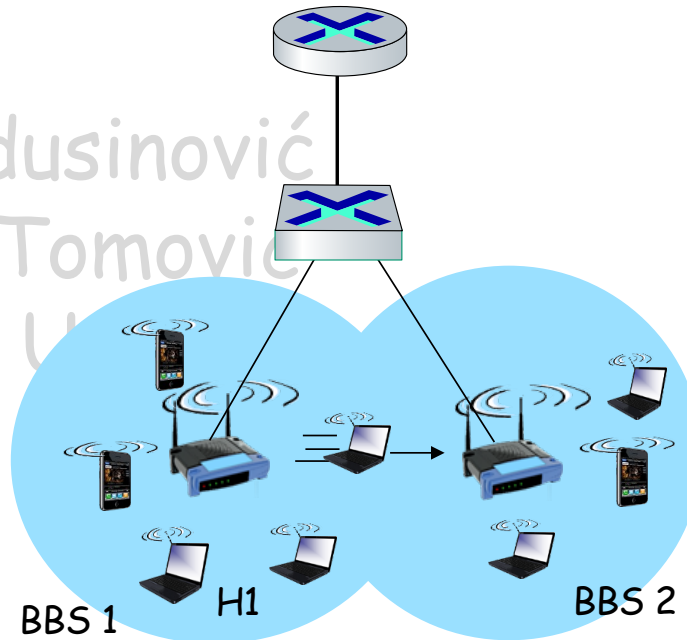


802.11 frejm



802.11: mobilnost unutar iste mreže

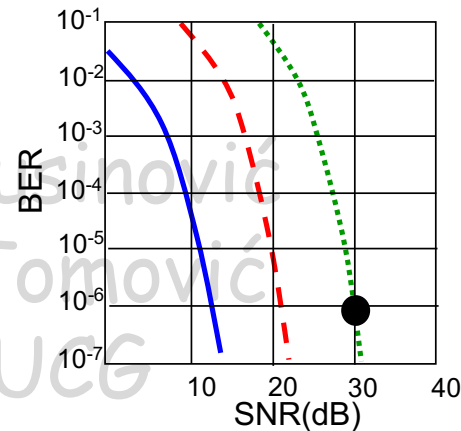
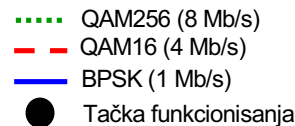
- ❑ Ukoliko H1 prelaskom iz zone pokrivanja jedne AP u zonu drugog AP ostaje u istoj IP mreži: IP adresa može ostati ista
- ❑ U suprotnom H1 mora dobiti novu IP adresu
- ❑ LAN *switch* metodom *self-learning* otkriva prelazak H1 na novi AP i ažurira svoju tabelu prosleđivanja na nivou linka



802.11: napredne mogućnosti

Adaptacija brzina

- AP i host dinamički mijenjanju brzine prenosa (promjenom vrste modulacije na fizičkom nivou)
- Kako se host pomjera, SNR se mijenja



1. SNR opada, BER raste dok se host udaljava od AP
2. Kada BER postane previsok, odnosno SNR nedovoljan, stanice prelaze na novu modulacionu tehniku što znači nižu brzinu prenosa ali i na niži BER

802.11: napredne mogućnosti

Power Management

- ❑ Host obavještava AP: “Idem da spavam do sledećeg *beacon* frejma”
 - AP zna da ne treba da šalje frejmove ovom hostu
 - Host se “budi” prije sledećeg *beacon* frejma (100ms sna) pri čemu buđenje traje 250μs
- ❑ *beacon* frejm: sadrži listu hostova za koje AP posjeduje frejmove
 - Host ostaje “budan” ako u *beacon* frejmu uoči svoju MAC adresu; u suprotnom ponovo ide na spavanje do narednog *beacon* frejma

Nivo linka

- ❑ Uvod, servisi
- ❑ Detekcija i korekcija greške
- ❑ Protokoli višestrukog pristupa
- ❑ LAN
 - MAC adresiranje
 - Ethernet
 - Switch
 - VLAN
- ❑ WiFi
- ❑ 4G
- ❑ Mreža data centra

Igor Radusinović
Slavica Tomović
ETF, UCG

4G/5G celularne mreže

- ❑ Tehnologije WAN mreža za mobilni Internet
- ❑ Masovno se implementiraju i koriste:
 - ❑ Više mobilnih širokopojasnih pristupnih uređaja nego žičnih širokopojasnih pristupnih uređaja (odnos 5:1 u 2019)!
 - ❑ 4G dostupnost: 97% u Južnoj Koreji (90% u SAD)
- ❑ Brzine prenosa od nekoliko stotina Mb/s.
- ❑ Tehnički standardi: *3rd Generation Partnership Project* (3GPP)
 - ❑ www.3gpp.org
 - ❑ 4G: *Long-Term Evolution* (LTE) standard

4G celularne mreže

Sličnost sa žičnim Internetom

- ❑ Razlikuju se pristupna mreža i jezgro.
- ❑ Globalna celularna mreža: mreža svih mreža.
- ❑ Široka primjena protokola: HTTP, DNS, TCP, UDP, IP, NAT, razdvajanje kontrolne ravni i ravni podataka, SDN, Ethernet, tunelovanje,...
- ❑ Povezivanje na žični Internet.

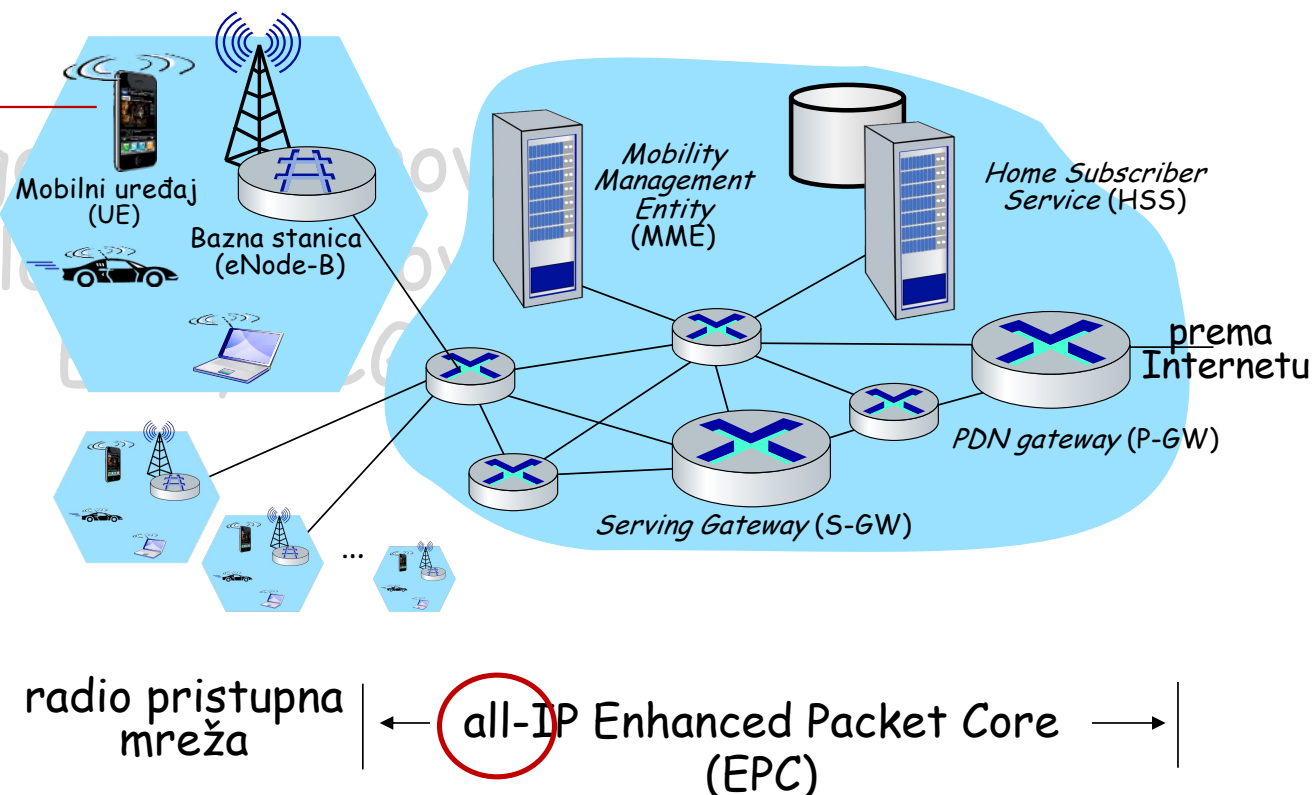
Razlike u odnosu na žični Internet

- ❑ Različiti bežični nivo linka.
- ❑ Mobilnost izuzetnog kvaliteta.
- ❑ Identitet korisnika (SIM kartica).
- ❑ Biznis model: korisnici se pretplaćuju kod celularnog operatora
- ❑ Postojanje "kućne" mreže i mreže u kojoj korisnici gostuju korišćenjem roaminga.
- ❑ Globalni pristup sa infrastrukturom sa autentifikaciju i povezivanje na različite operatore.

Elementi 4G LTE arhitekture

Mobilni uređaji:

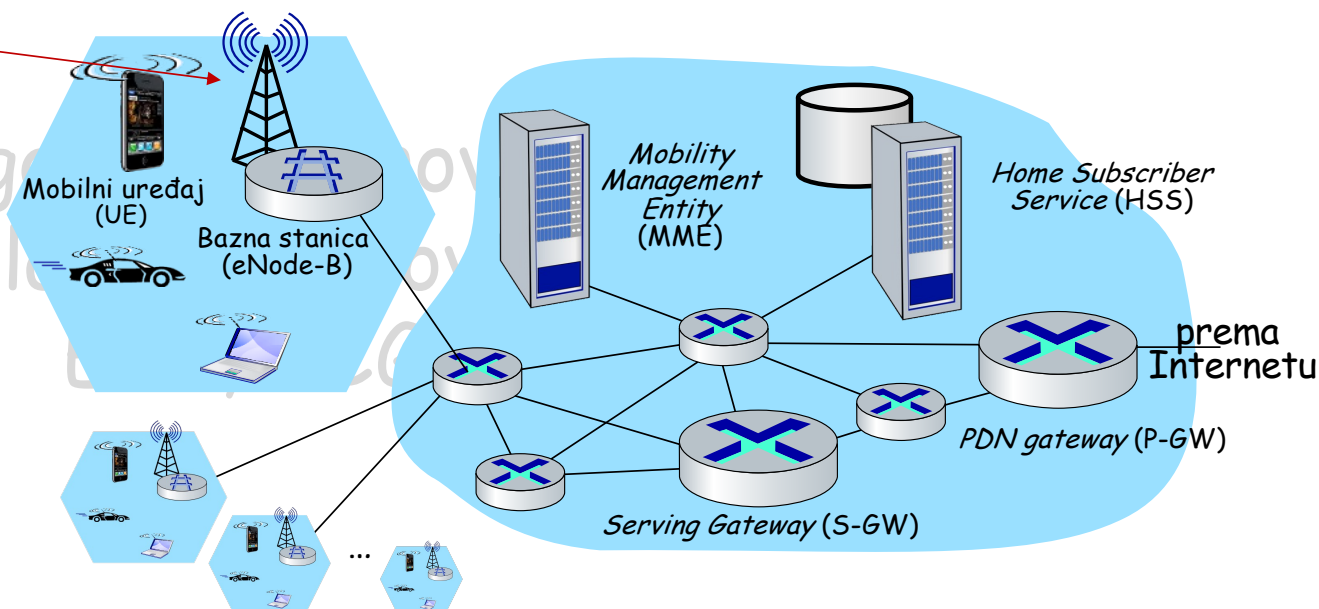
- Pametni telefon, tablet, laptop, IoT, ... sa 4G LTE radio
- 64-bitni *International Mobile Subscriber Identity (IMSI)*, smješten na SIM (*Subscriber Identity Module*) kartici
- LTE žargon: *User Equipment (UE)*



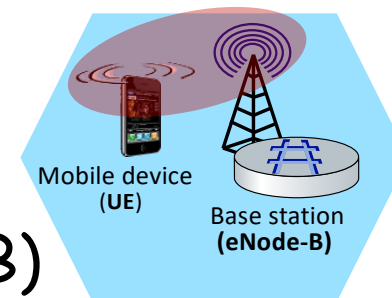
Elementi 4G LTE arhitekture

Bazna stanica:

- ❑ Ivica operatorove mreže.
- ❑ Upravlja radio resursim i mobilnim uređajima u svojoj zoni pokrivanja ("ćelija").
- ❑ Koordinira autentifikaciju uređaja sa drugim mrežnim elementima.
- ❑ Slična WiFi AP ali:
 - ❑ Aktivno učestvuje u korisnikovoj mobilnosti
 - ❑ Koordinira sa susjednim baznim stanicama korišćenje radio resursa
- ❑ LTE žargon: eNode-B



Radio pristupna mreža: 4G radio



- ❑ Povezuje uređaj (UE) na baznu stanicu(eNode-B)
 - Više uređaja je povezano na baznu stanicu
- ❑ Koristi se mnogo frekvencijskih opsega i veliki broj kanala u svakom opsegu
 - popularni kanali: 600, 700, 850, 1500, 1700, 1900, 2100, 2600, 3500 MHz
 - odvojeni upstream i downstream kanali
- ❑ dijeljenje 4G radio kanala između više korisnika:
 - **OFDM**: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
 - kombinacija FDM, TDM
- ❑ 100-tine Mb/s su na raspolaganje korisniku

Elementi 4G LTE arhitekture

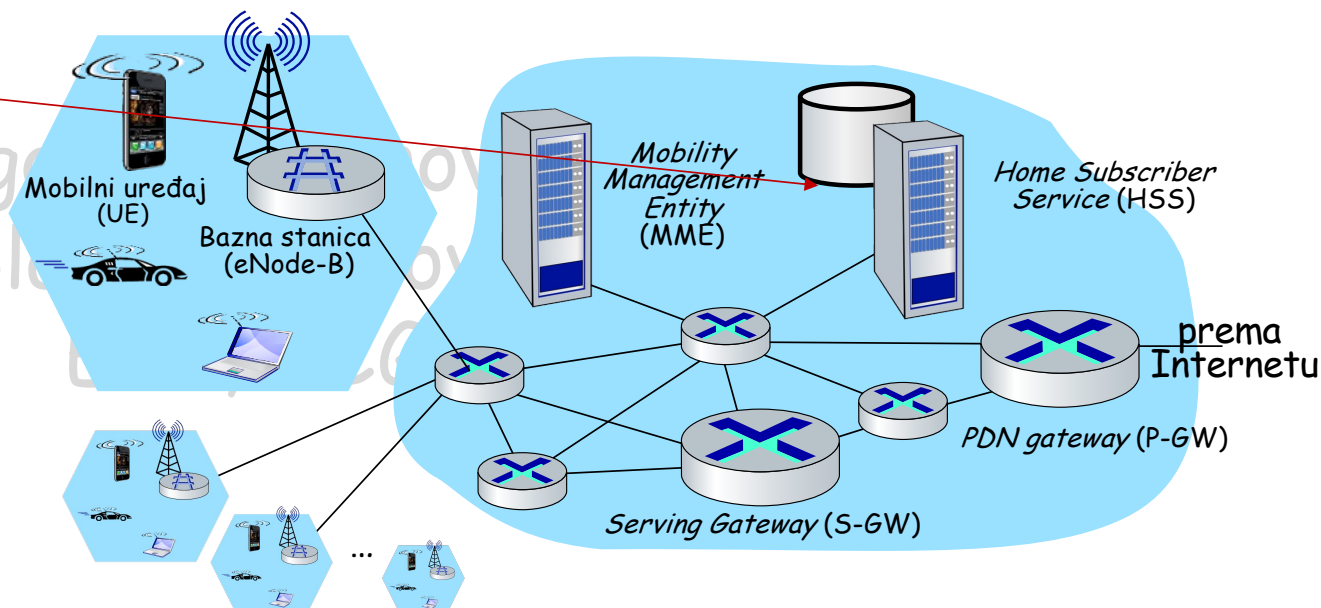
Home Service

- Sadrži informacije korisnicima kojim njegova "kućna mreža"
- Sarađuje sa MME u autentifikaciji uređaja

Subscriber

o je

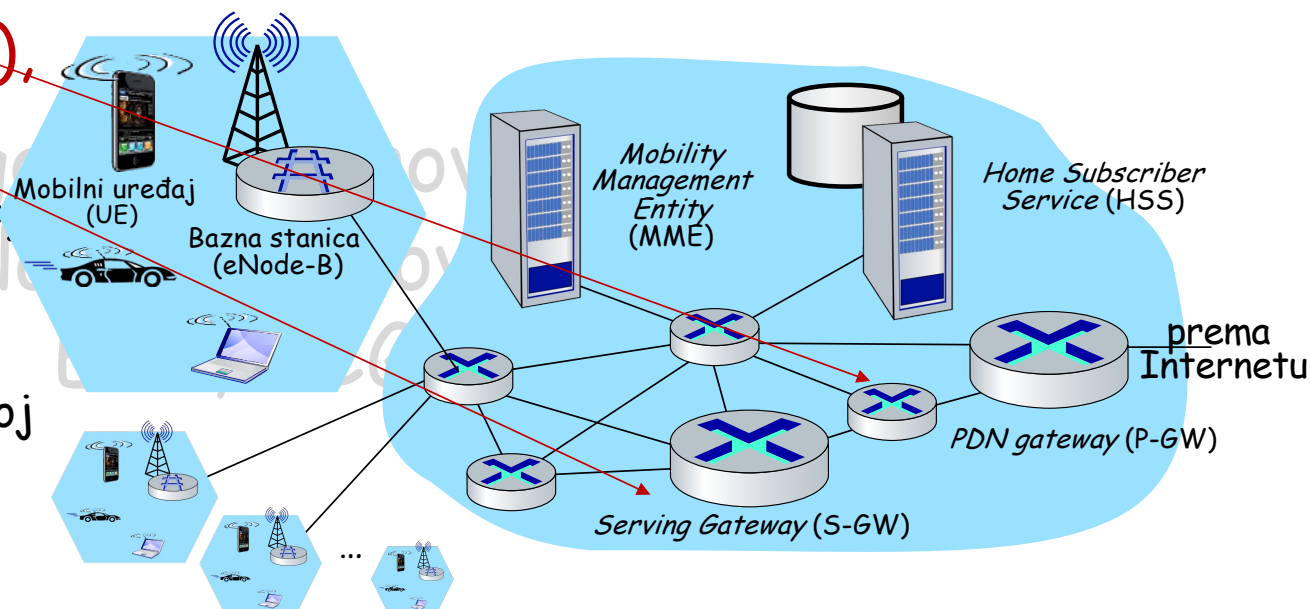
u



Elementi 4G LTE architecture

Serving Gateway (S-GW), PDN Gateway (P-GW)

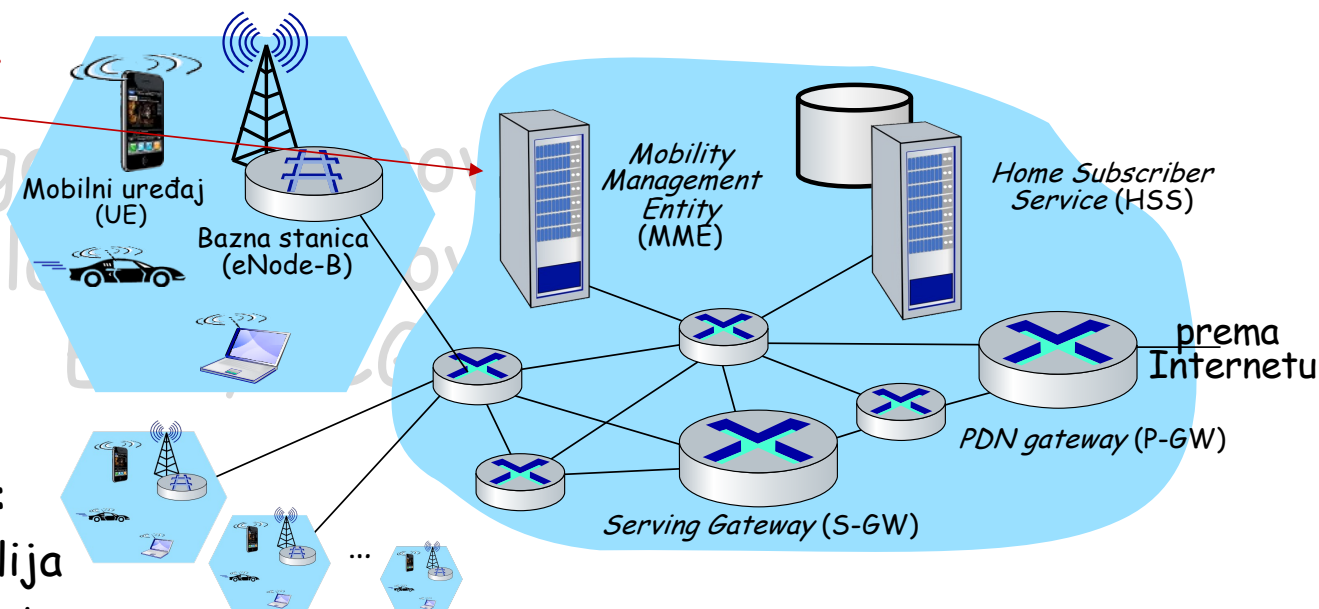
- ☐ Nalaze se na putu od mobilnog terminala do od Interneta
- ☐ P-GW
 - ☐ gateway prema mobilnoj celularnoj mreži
 - ☐ Sličan Internet gateway ruteru
 - ☐ omogućava NAT servise
- ☐ Drugi ruteri:
 - ☐ Intenzivno korišćenje tunelovanja



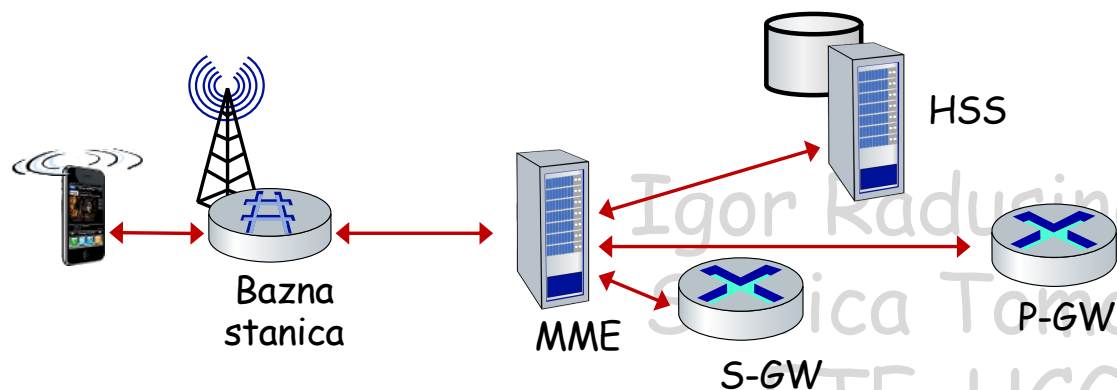
Elementi 4G LTE arhitekture

Mobility Management Entity

- ❑ Autentifikacija (uređaj-mreža, mreža-uređaj) u koordinaciji sa HSS-om kućne mreže.
- ❑ Menadžment mobilnog uređaja:
 - ❑ handover uređaja između ćelija
 - ❑ praćenje/paging lokacije uređaja
- ❑ Uspostavljanje puta (tunela) od mobilnog uređaja do P-GW

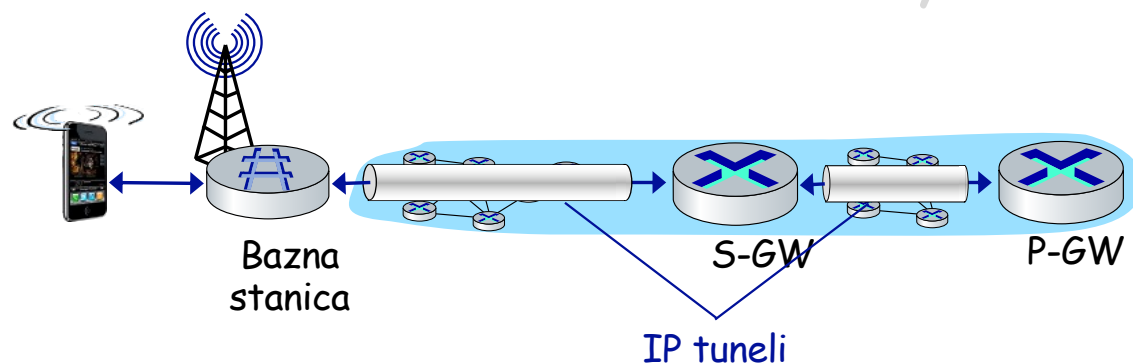


LTE: odvojenost kontrolne ravni i ravni podataka



Kontrolna ravan

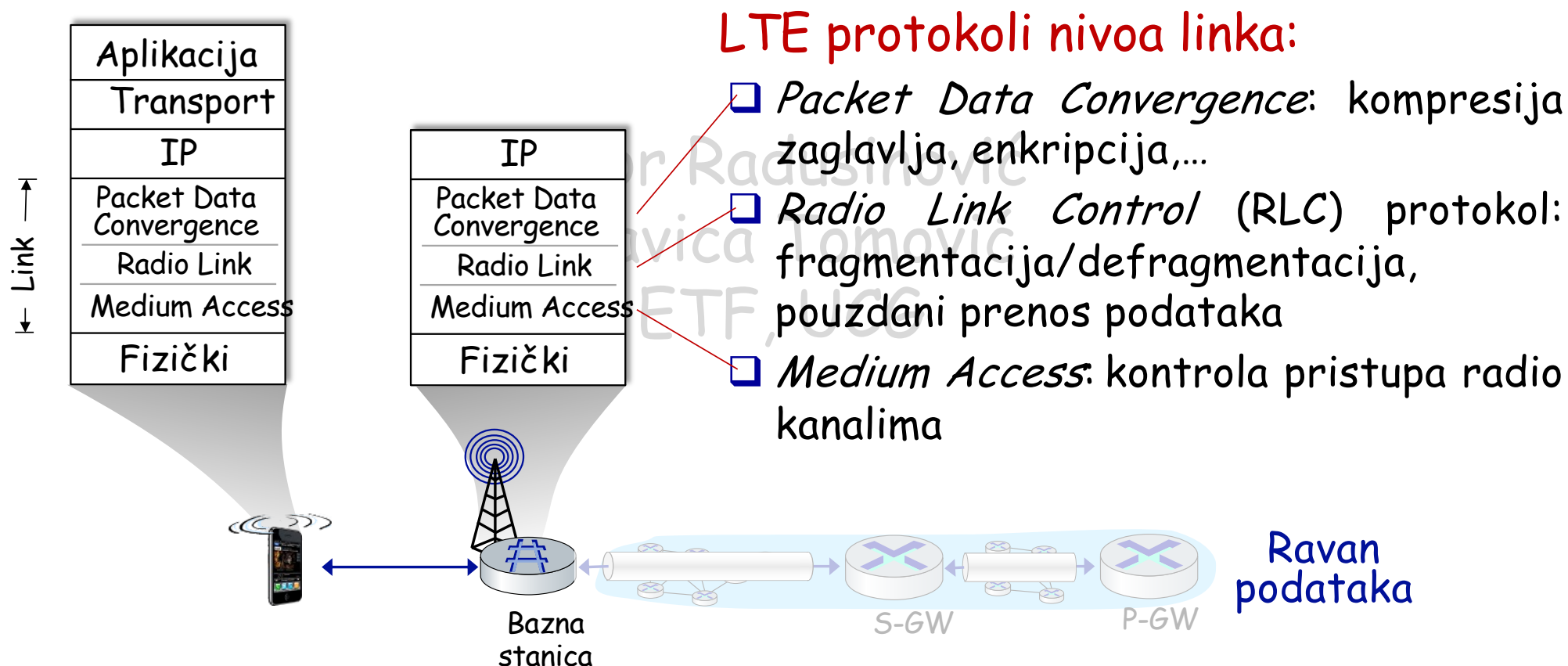
- Novi protokoli za menadžment mobilnosti, zaštitu, autentifikaciju,...



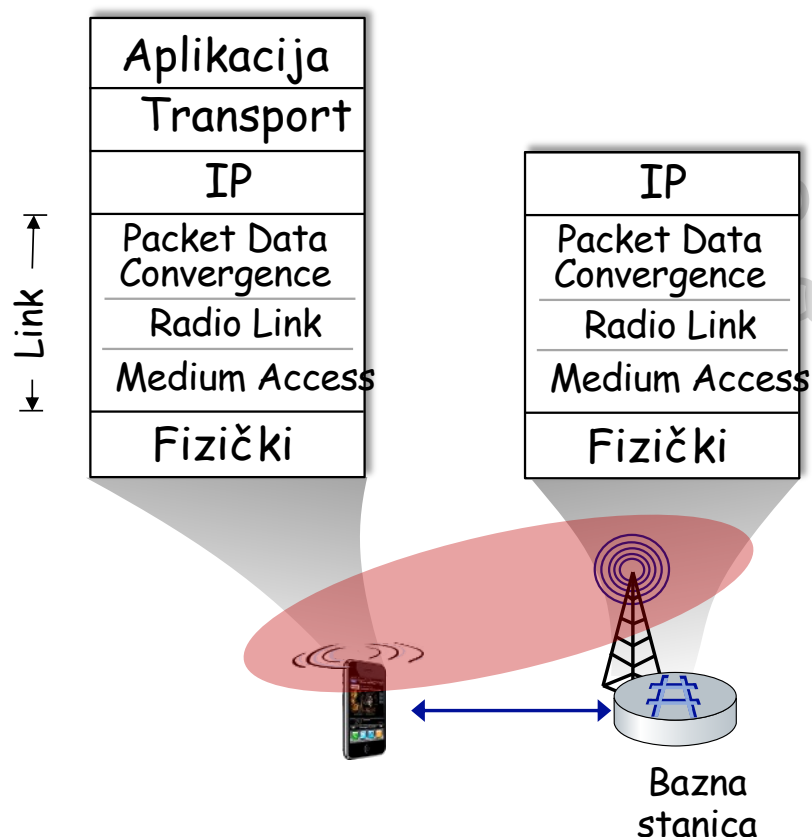
Ravan podataka

- Novi protokoli na nivoima linka i fizičkom nivou
- Intenzivno korišćenje tunelovanja u cilju obezbjeđivanja mobilnosti

LTE protokoli ravni podataka: prvi hop



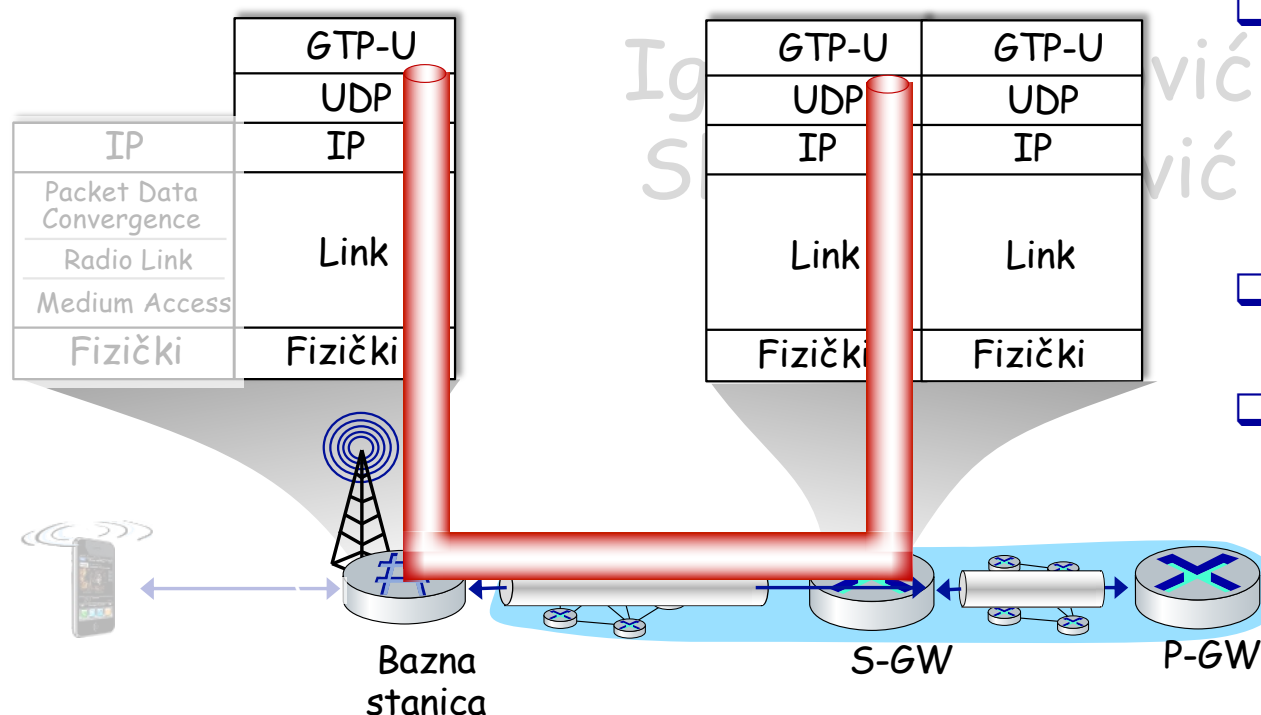
LTE protokoli ravni podataka: prvi hop



LTE radio pristupna mreža:

- *downstream* kanal: FDM, TDM unutar frekvencijskog kanala (OFDM - *orthogonal frequency division multiplexing*)
- "orthogonal": minimalna interferencija između kanala
- *upstream*: FDM, TDM sličan OFDM
- Svakom aktivnom mobilnom terminalu se alocira dva ili više 0.5 ms vremenskih slotova na 12 frekvencija
- *scheduling* algoritam nije standardizovan i zavisi od proizvođača opreme i operatora
- Moguće brzine prenosa su od nekoliko stotina Mb/s po korisničkom uređaju

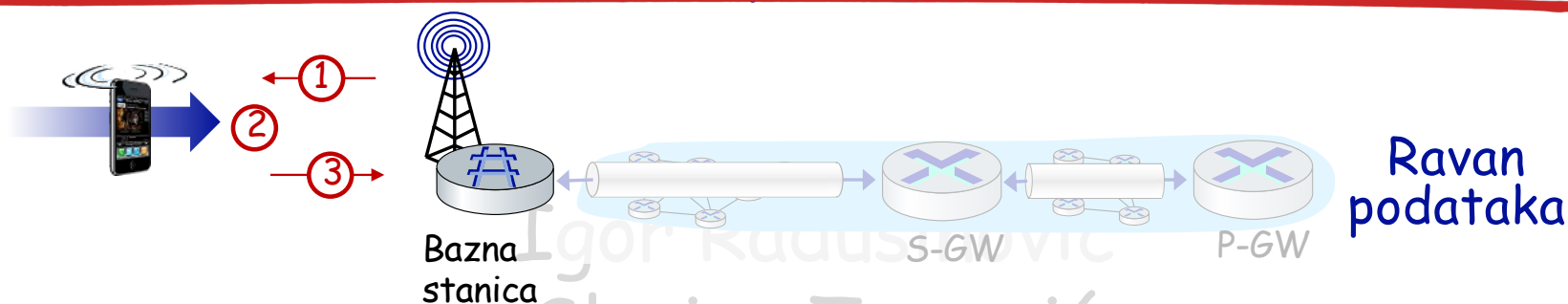
LTE protokoli ravni podataka: *packet core*



Tunelovanje:

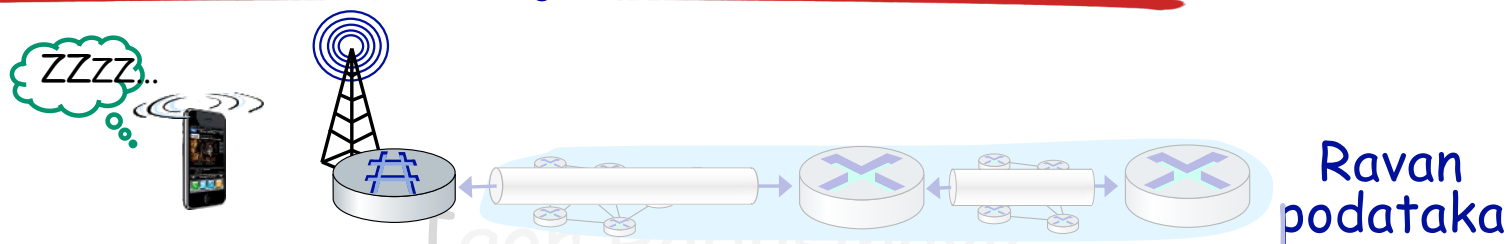
- ❑ Mobilni uređaj enkapsulira datagram korišćenjem *GPRS Tunneling Protocol (GTP)*, i šalje unutar UDP datagram prema S-GW
- ❑ S-GW re-tuneluje datagrame prema P-GW
- ❑ Podržavanje mobilnosti: samo se mijenjaju krajne tačke tunela kada se mobilni korisnik kreće

LTE ravan podataka: povezivanje na BS



- ① BS broadcastuje primarni sinhro signal svakih 5 ms na svim frekvencijama
 - ❑ BS više različitih operatora mogu broadcastovati sinhro signale
- ② Mobilni terminal pronalazi primarni sinhro signal, zatim locira sekundarni sinhro signal na toj frekvenciji.
 - ❑ Mobilni pronalazi informacije koje broadcastuje BS: opseg kanala, konfiguracije; informacije o operatoru
 - ❑ Mobilni može prikupiti informacije od više baznih stanica različitih celularnih mreža
- ③ Mobilni bira BS na koji će se povezati (npr., svog operatora)
- ④ Više koraka je potrebno za autentifikaciju, uspostavljanje stanja i ravni podataka.

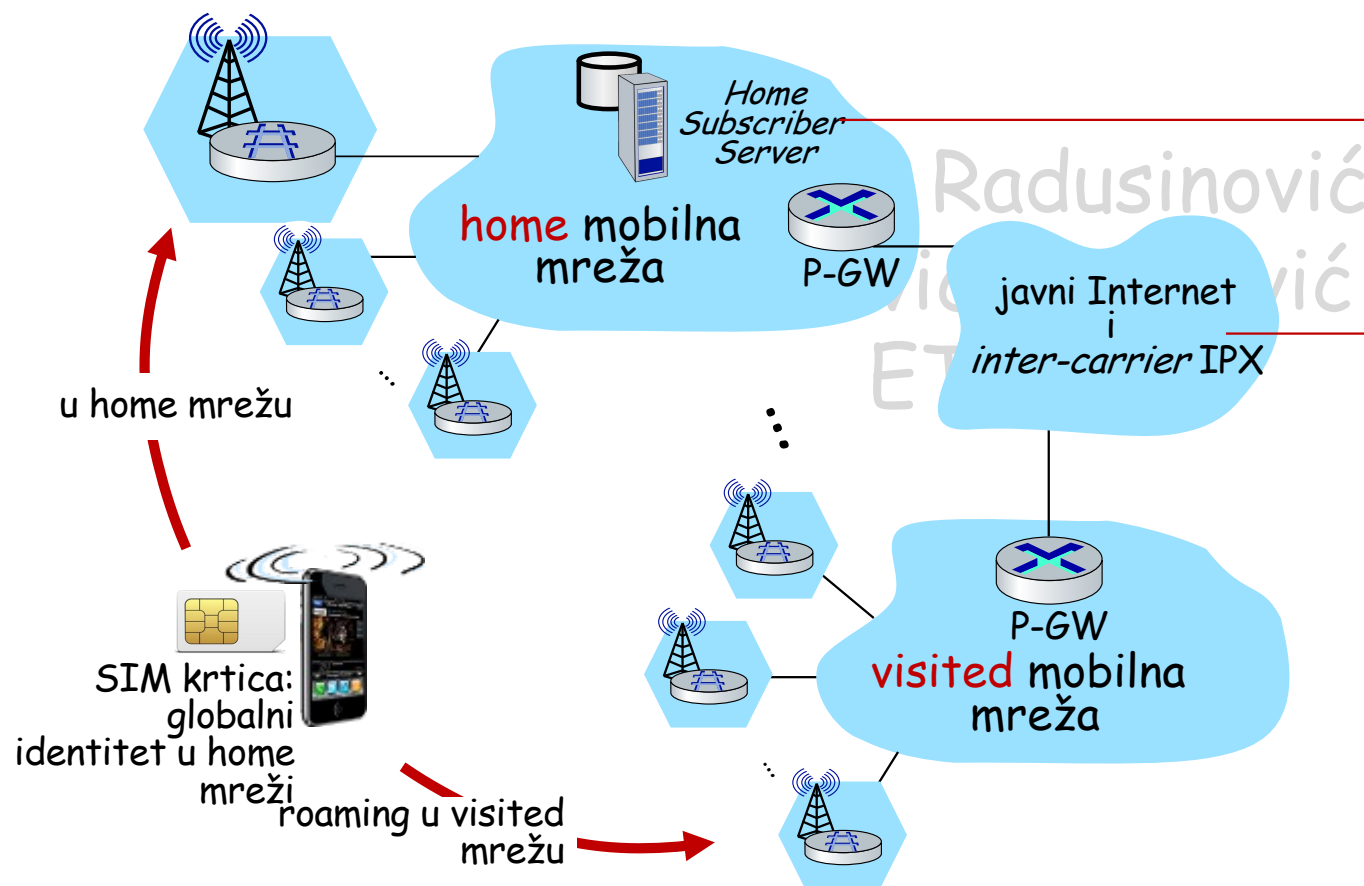
LTE mobilni uređaji: sleep mod



Kao kod WiFi, Bluetooth: LTE mobilni terminal može otići u "sleep" mod kako bi smanjio potrošnju baterije:

- ❑ *light sleep*: poslije nekoliko stotina ms neaktivnosti
 - ❑ Periodično se budi svakih nekoliko stotina ms da provjeri downstream komunikaciju
- *deep sleep*: poslije 5-10s neaktivnosti
 - Mobilni može napustiti ćeliju tokom deep sleep-a što podrazumijeva ponovno povezivanje na BS.

Globalna celularna mreža: mreža IP mreža



HSS home mreže:

- Informacije o identitetu i servisima, dok je u home mreži i roaming-u

all IP:

- Operatori se međusobno povezuju
- 2G, 3G: nisu svi IP pa imaju drugačija rješenja

Mreže datacentara

Stotine hiljada hostova:

- ☐ e-business (Amazon,...)
- ☐ Serveri sadržaja (YouTube, Akamai, Apple, Microsoft)
- ☐ pretraživači, data mining (Google,...)

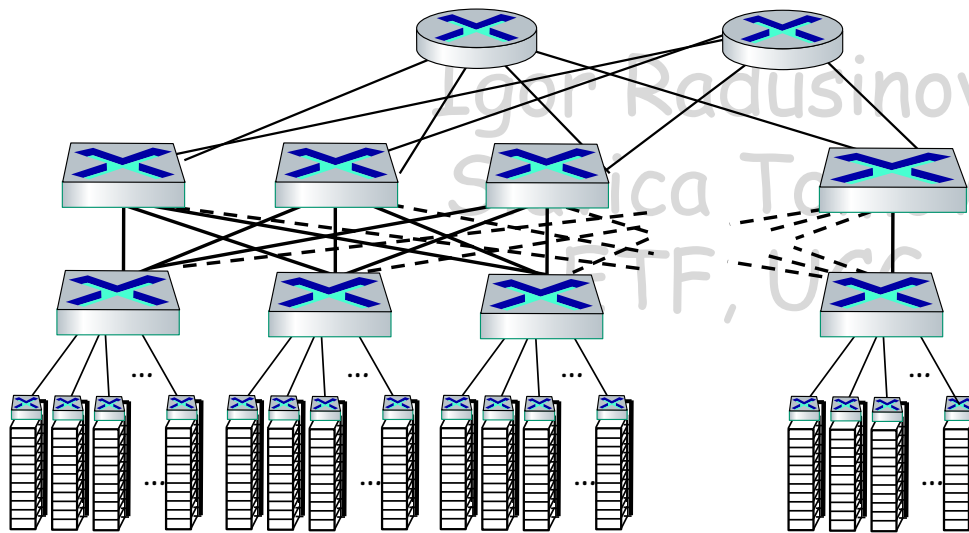
Izazovi:

- ☐ Veliki broj aplikacija koje poslužuju ogroman broj klijenata
- ☐ Pouzdanost
- ☐ Balansiranje opterećenja radi sprečavanja pojavljivanja uskih grla



Microsoft container, data centar u Čikagu

Mreža datacentra



Border ruteri

- Povezivanje sa okruženjem

Tier-1 switch-evi

- Povezivanje Tier-2 switcheve

Tier-2 switch-evi

- Povezivanje TOR switcheve

Top of Rack (TOR) switch

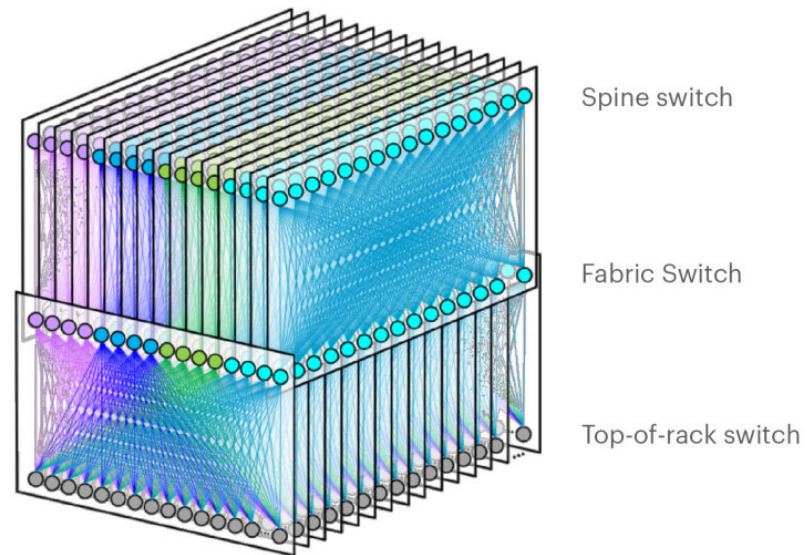
- Jedan po rack-u
- 40-100Gb/s Ethernet do blade servera

Server rekovi

- 20- 40 blade -servera:
- hostova

Mreža datacentra

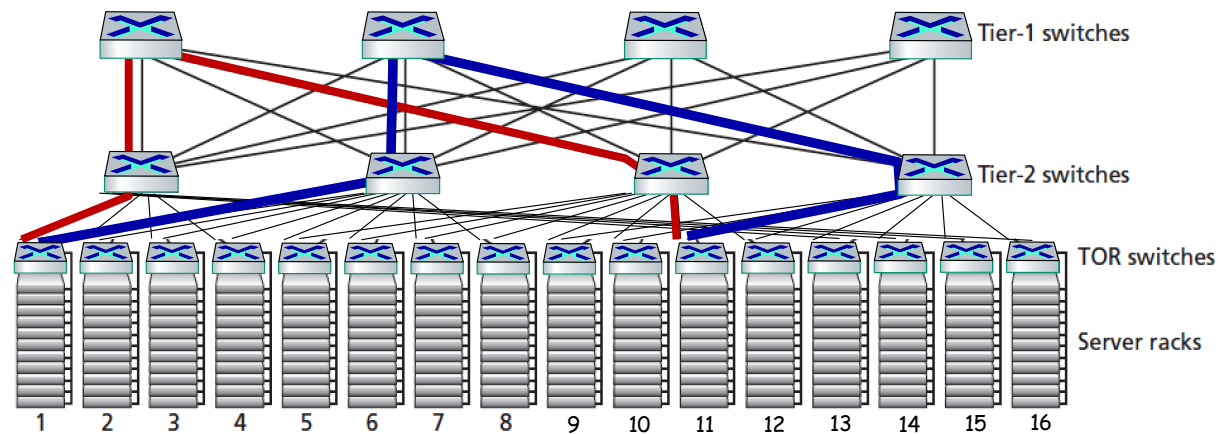
Mrežna topologija Facebook F16 data centra



<https://engineering.fb.com/data-center-engineering/f16-minipack/> (posted 3/2019)

Mreža datacentra

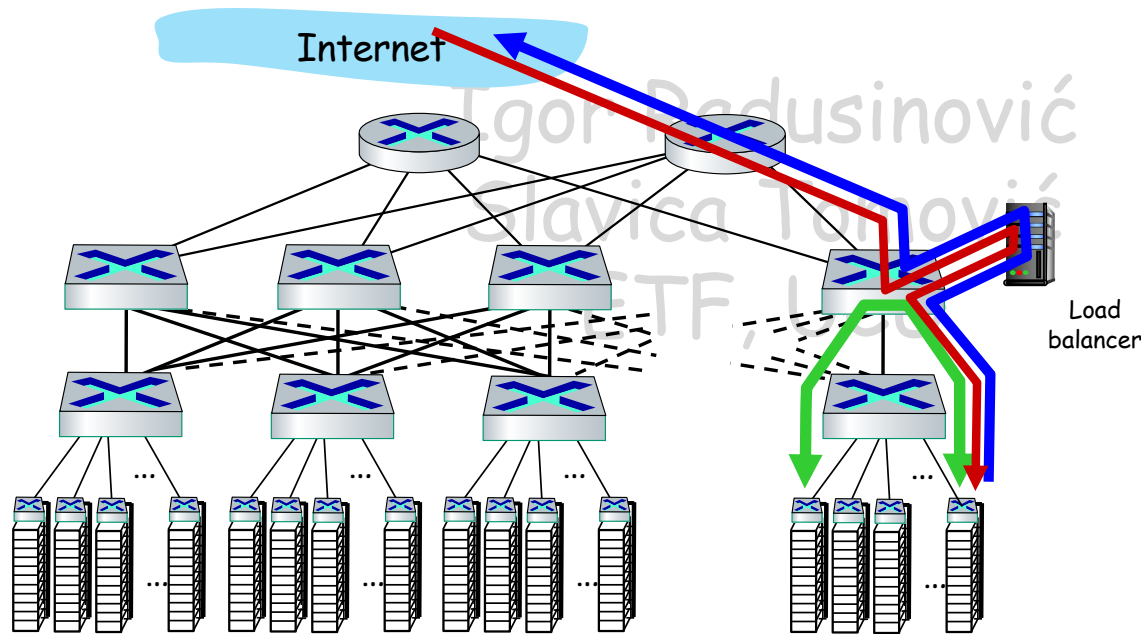
- ❑ Veliki broj veza između switch-eva, rack-ova:
- ❑ Povećanje propusnosti između rekova (više mogućih ruta)
- ❑ Povećanje pouzdanosti zbog redundanse



dva **razdvojena** puta između rekova 1 i 11

Mreža datacentra

Rutiranje nivoa aplikacije



Balanser opterećenja: rutiranje nivoa aplikacije

- Prima zahteve eksternih klijenata
- Usmjerava opterećenje u data centru
- Šalje odgovore eksternom klijentu (krijući od eksternog korisnika informacije o data centru)

Mreža datacentra

Inovacije na protokolima

□ Nivo linka:

- RoCE: remote DMA (RDMA) preko Converged Ethernet

□ Nivo transporta:

- ECN (*explicit congestion notification*) se koristi za kontrolu zagušenja na nivou transporta (DCTCP, DCQCN)
- Eksperimentisanje sa *hop-by-hop (backpressure)* kontrolom zagušenja

□ rutiranje, menažment:

- SDN se široko koristi u data centrima
- postavljanje servisa podataka što je moguće bliže (u susjednom ili čak istom rack-u) radi minimizacije tier-2, tier-1 komunikacije

Nivo linka

Ispitna pitanja

1. Objasniti servise nivoa linka i način njegove implementacije
2. Slotted Aloha i Aloha
3. Polling i token ring
4. Ilustrovati i objasniti funkcionisanje ARP protokola u slučaju da je destinacija u istom LAN-u
5. Ilustrovati i objasniti funkcionisanje ARP protokola u slučaju da je destinacija van LAN-a
6. Ethernet (topologija, frejm)
7. Ethernet CSMA-CD
8. Ethernet standardi
9. Ethernet switch (funkcija, self-learning, povezivanje u mrežu)
10. VLAN
11. Elementi bežične računarske mreže
12. IEEE 802.11 (arhitektura, kanali, povezivanje na WiFi mrežu)
13. WiFi MAC kontrole
14. 4G
15. Mreža data centra