

Glava 6: Nivo linka

Ciljevi:

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

6: Nivo linka 6-1

1

Nivo linka

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

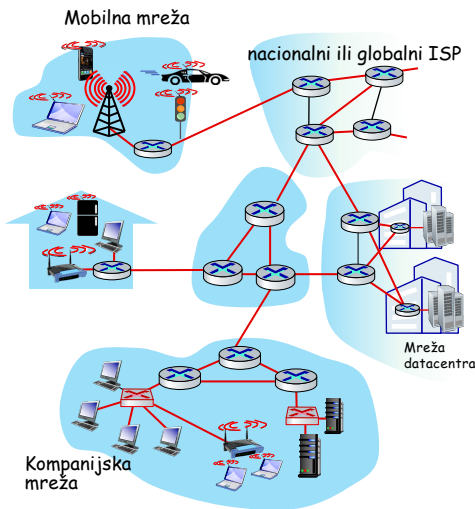
6: Nivo linka 6-2

2

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

6: Nivo linka 6-3

3

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

6: Nivo linka 6-4

4

Servisi nivoa linka

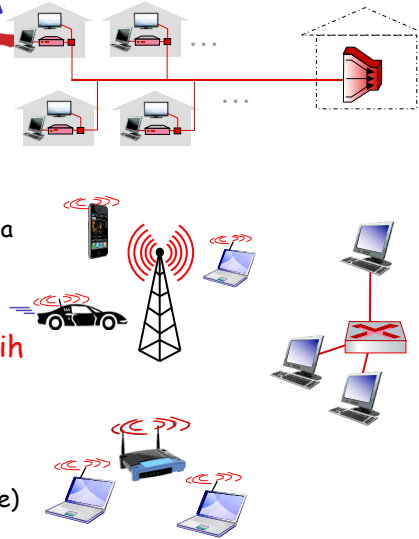
■ Kreiranje frejmova, pristup linku:

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

■ Pouzdana predaja između susjednih čvorišta

- Već smo to radili!
- Često se ne koriste 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?



6: Nivo linka 6-5

5

Servisi nivoa linka (više)

■ Kontrola protoka:

- Podešavanje brzina slanja čvorišta

■ Detekcija greške:

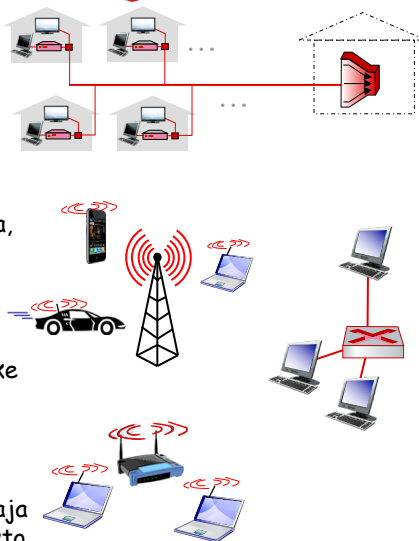
- Greške izazvane slabljenjem signala, šumom.
- Prijemnik detektuje prisustvo grešaka, signalizira pošiljaocu da odradi retransmisiju i odbacuje frejm

■ 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

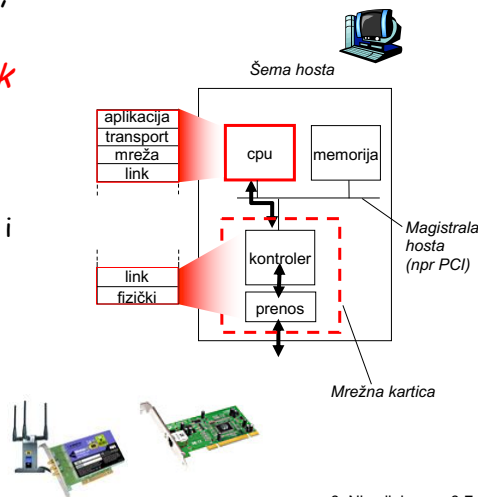


6: Nivo linka 6-6

6

Gdje se implementira nivo linka?

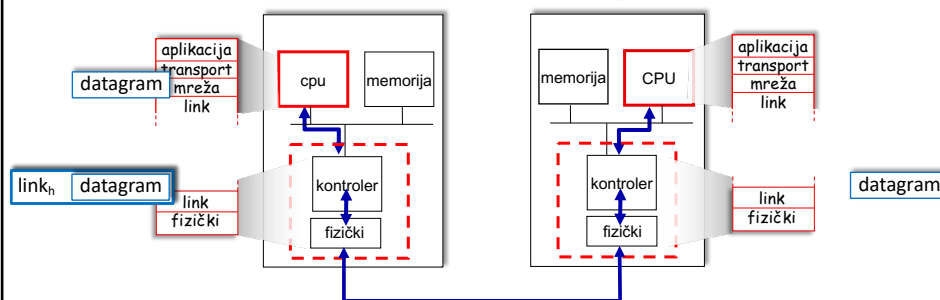
- u svakom hostu, switchu, ruteru,...
- mrežni adapter (*network interface card* NIC)
 - Ethernet kartica, PCMCIA kartica, 802.11 kartica
 - Implementira fizički nivo i nivo linka
- Povezan na sistemsku magistralu
- kombinacija hardware, software, firmware



6: Nivo linka 6-7

7

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

6: Nivo linka 6-8

8

Nivo linka

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

6: Nivo linka 6-9

9

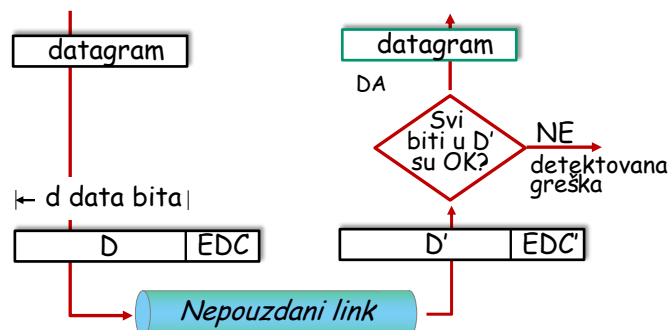
Detekcija greške

EDC= Biti detekcije i korekcije greške (redundansa)

D = 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

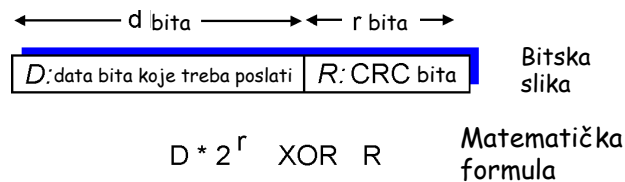


6: Nivo linka 6-10

10

Cyclic Redundancy Check

- ❑ data biti, D , 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,...)



6: Nivo linka 6-11

11

Nivo linka

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

6: Nivo linka 6-12

12

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
 - WiFi, 4G/5G, satelit



13

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

6: Nivo linka 6-14

14

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

6: Nivo linka 6-15

15

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.

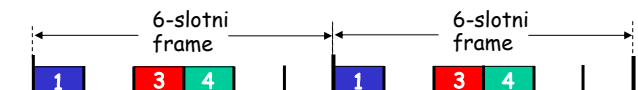
6: Nivo linka 6-16

16

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

6: Nivo linka 6-17

17

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

6: Nivo linka 6-18

18

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

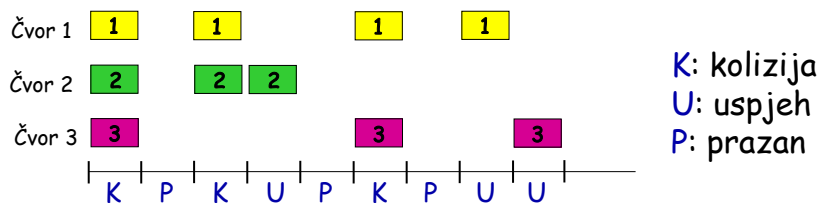
Funkcionisanje

- 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

6: Nivo linka 6-19

19

Slotted ALOHA



Za

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

Protiv

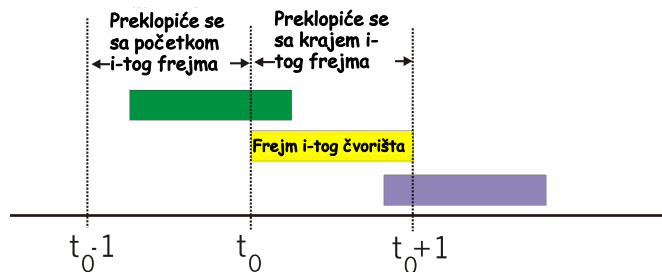
- kolizije, gubitak slotova
- prazni slotovi
- čvorišta moraju biti u mogućnosti da detektuju kolizije u kraćem vremenu od vremena prenosa paketa
- sinhronizacija takta
- efikasnost 37%

6: Nivo linka 6-20

20

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 18%



6: Nivo linka 6-21

21

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!

6: Nivo linka 6-22

22

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



Vrijeme t_0

↓

t_1

6: Nivo linka 6-23

23

CSMA/CD (Collision Detection)

CSMA/CD: "oslušivanje prisustva nosioca"

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

□ Detekcija kolizije:

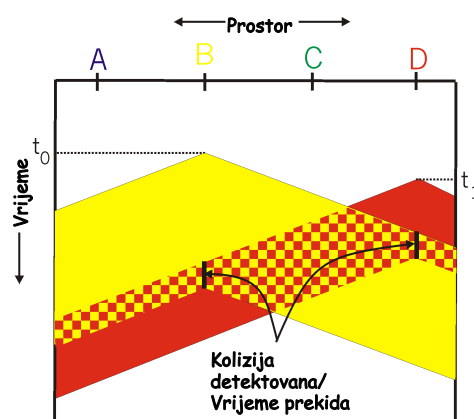
- Laka u žičnim LAN-ovima: mjerenje snage signala, upoređenje poslatih i primljenih signala
- Teško u WLAN-ovima: prijemnik ćuti dok se šalje

□ analogija: ljubazna konverzacija

6: Nivo linka 6-24

24

CSMA/CD detekcija kolizije



6: Nivo linka 6-25

25

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!

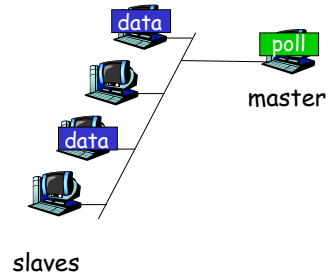
6: Nivo linka 6-26

26

MAC protokoli “Uzimanje prava”

Polling:

- ❑ master čvorište “proziva” slave čvorišta da šalju
- ❑ problemi:
 - *polling* zaglavlje
 - kašnjenje
 - nepouzdanost zbog otkaza mastera



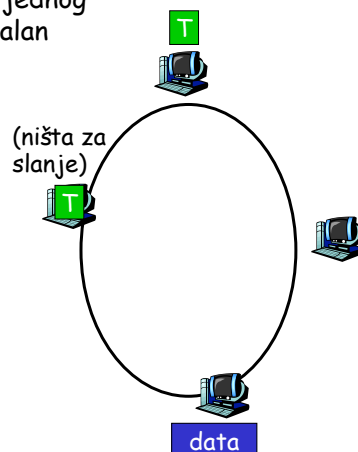
6: Nivo linka 6-27

27

MAC protokoli “Uzimanje prava”

Prosleđivanje tokena:

- ❑ Kontrolni token se prosleđuje od jednog čvorišta do drugog na sekvencionalan način.
- ❑ token poruke
- ❑ problemi:
 - token zaglavlje
 - kašnjenje
 - nepouzdanost zbog gubitka tokena



6: Nivo linka 6-28

28

Nivo linka

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

6: Nivo linka 6-29

29

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

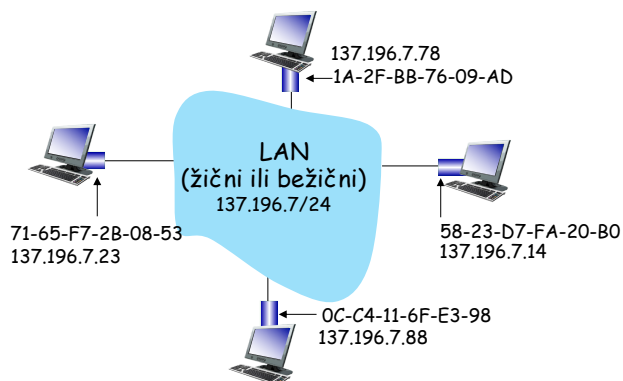
6: Nivo linka 6-30

30

LAN adrese i ARP

Svaki adapter u LAN-u ima jedinstvenu

- ❑ LAN adresu
- ❑ IP adresu



6: Nivo linka 6-31

31

LAN adrese (više)

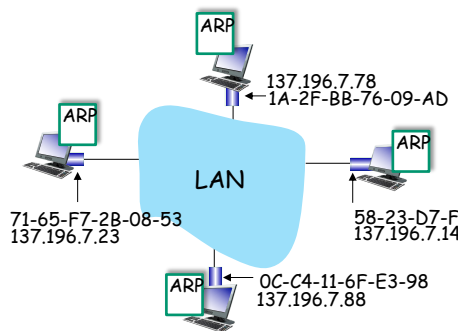
- ❑ Dodjela MAC adrese se vrši od strane IEEE
- ❑ Proizvođači kupuju dio MAC adresnog prostora (da bi obezbijedili jedinstvenost adrese)
- ❑ Analogija:
 - MAC adresa: kao matični broj
 - IP adresa: kao poštanska adresa
- ❑ MAC nehijerarhijska adresa → portabilnost
 - LAN kartica se može seliti iz mreže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

6: Nivo linka 6-32

32

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

6: Nivo linka 6-33

33

ARP: isti LAN

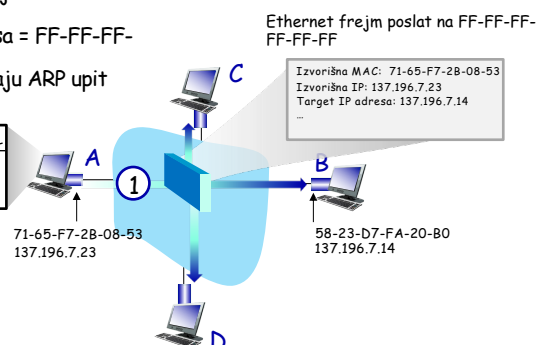
A šalje datagram čvoru B

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

- ① A broadcastuje ARP upitkoji sadrži IP adresu čvora B
 - destinaciona MAC adresa = FF-FF-FF-FF-FF-FF
 - Svi čvorovi u LAN primaju ARP upit

ARP tabela u A

IP adr	MAC addr	TTL



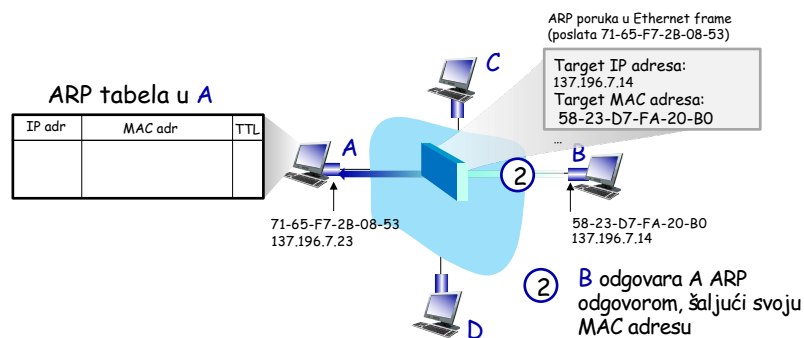
6: Nivo linka 6-34

34

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



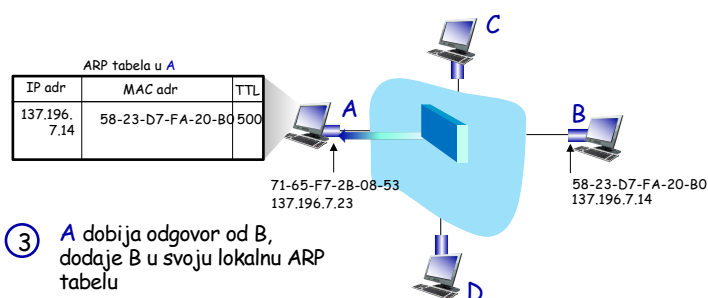
6: Nivo linka 6-35

35

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



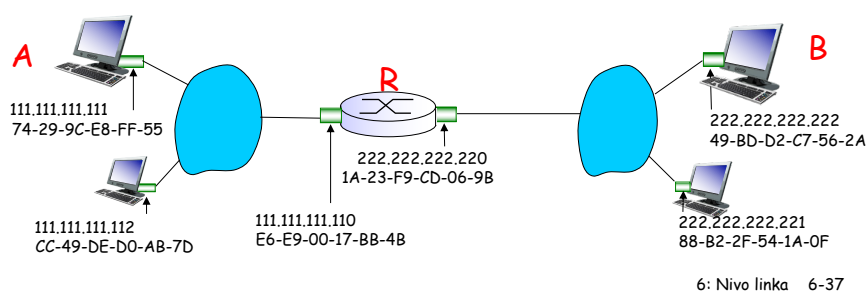
6: Nivo linka 6-36

36

Adresiranje: rutiranje do druge LAN

Zadatak: **poslati datagram od A do B preko R**

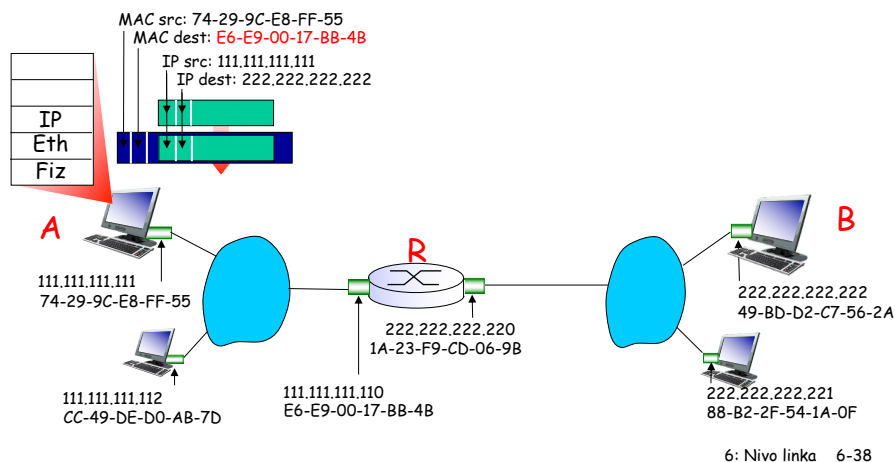
- fokus na adresiranju u IP datagranu i MAC frejmu
- pretpostaviti da A poznaje
 - IP adresu hosta B
 - IP adresu rutera R (kako?)
 - MAC adresu rutera R (kako?)



37

Adresiranje: rutiranje do druge LAN

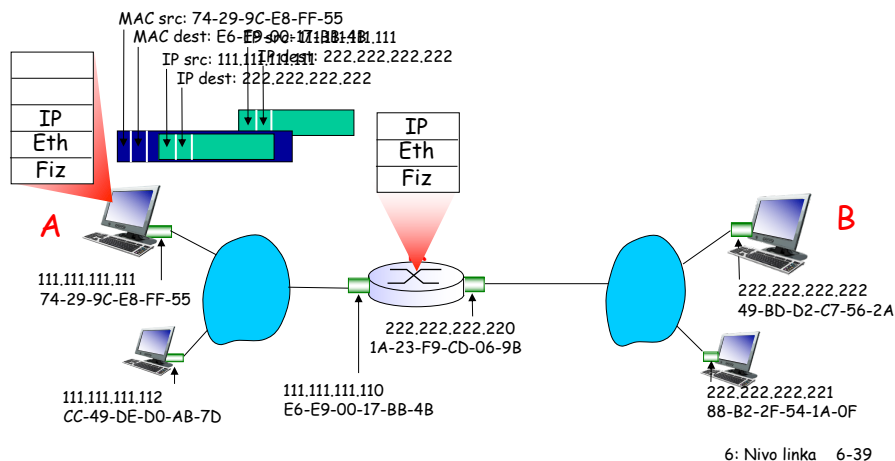
- A kreira IP datagram sa IP izvorišnom adresom A, destinacionom B
- A kreira frejm sa MAC adresom rutera R kao destinacijom, frejm sadrži IP datagram koji treba da se prenese od A do B



38

Adresiranje: rutiranje do druge LAN

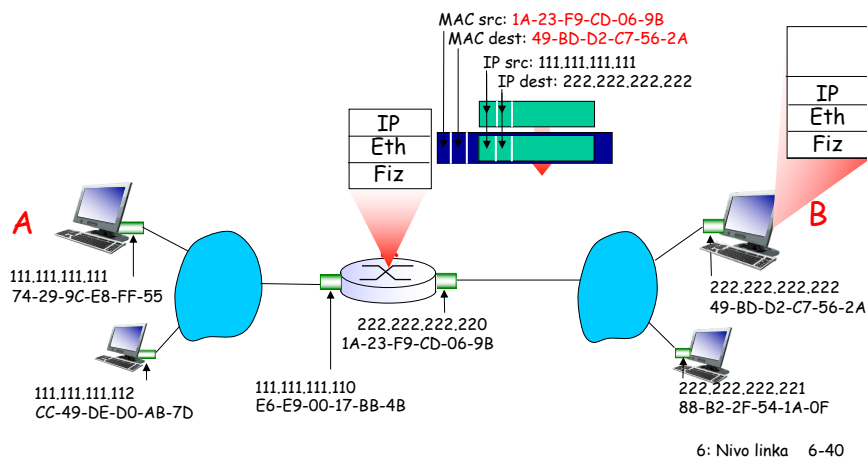
- Frejm se šalje od A do R
- R prima frejm, datagram se prosleđuje IP protokolu na obradu



39

Adresiranje: rutiranje do druge LAN

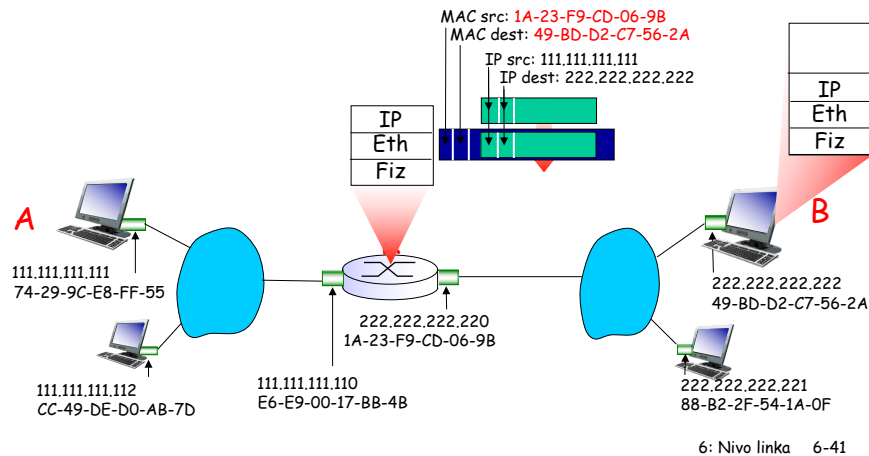
- R prosleđuje datagram sa izvorišnom IP adresom A, destinacijom B
- R kreira frejm nivoa linka sa MAC adresom B kao destinacijom, frejm sadrži IP datagram koji treba da se prenese od A za B



40

Adresiranje: rutiranje do druge LAN

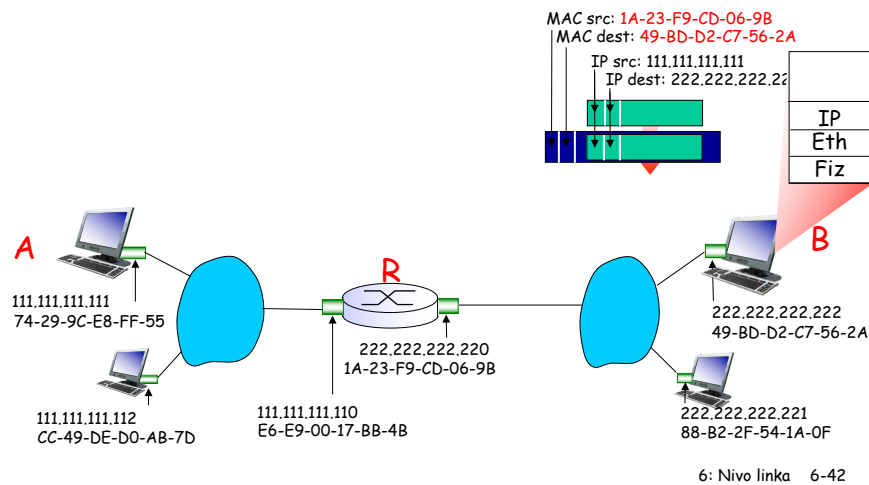
- R prosleđuje datagram sa izvorišnom IP adresom A, i destinacionom B
- R kreira frejm sa MAC adresom B kao destinacijom, frejm sadrži datagram koji treba preneti od A do B



41

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



42

Nivo linka

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

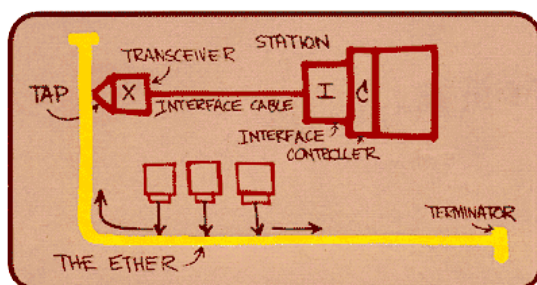
6: Nivo linka 6-43

43

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 - 400 Gb/s



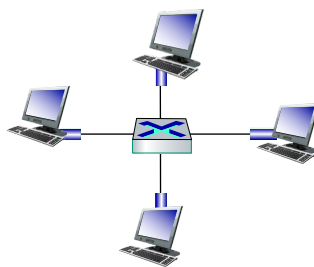
Metcalfe-ova skica
Etherneta

6: Nivo linka 6-44

44

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

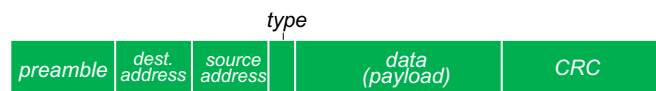


6: Nivo linka 6-45

45

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

6: Nivo linka 6-46

46

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)

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

type



6: Nivo linka 6-47

47

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

6: Nivo linka 6-48

48

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*

6: Nivo linka 6-49

49

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.

6: Nivo linka 6-50

50

Ethernet CSMA/CD (više)

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

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

Eksponencijalni Backoff:

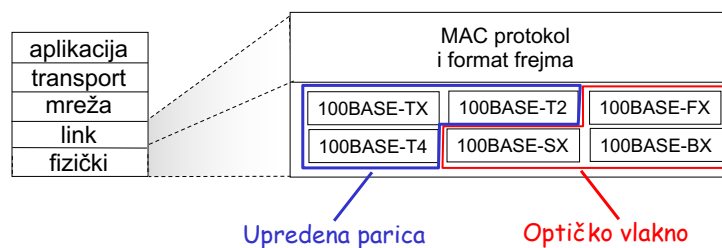
- *Cilj:* adaptirati pokušaje retransmisije kako bi se estimiralo trenutno opterećenje
 - Veliko opterećenje: slučajno kašnjenje će biti duže
- Prva kolizija: izaberi K iz {0,1}; kašnjenje je jednako 0 ili trajanju 512 bita
- Poslije druge kolizije: bira K iz {0,1,2,3}...
- Poslije deset kolizija, nira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

6: Nivo linka 6-51

51

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
 - Medijumi za prenos: optičko vlakno, upredena parica,...



6: Nivo linka 6-52

52

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

6: Nivo linka 6-53

53

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 slota 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

6: Nivo linka 6-54

54

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

6: Nivo linka 6-55

55

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 <i>twinax</i> 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

6: Nivo linka 6-56

56

Nivo linka

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

6: Nivo linka 6-57

57

Ethernet switch

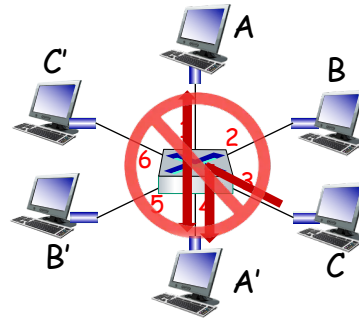
- ❑ **Uređaj nivoa linka**
 - Prihvata i prosleđuje Ethernet frejmove
 - Ispituje zaglavlje frejma i **selektivno** prosleđuje frejm na bazi MAC destinacione adrese
 - Kada se frejm prosleđuje na lokalnu mrežu, koristi se CSMA/CD za pristup lokalnoj mreži
- ❑ Transparento
 - Hostovi ne osjećaju prisustvo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

6: Nivo linka 6-58

58

Switch: više istovremenih prenosa

- Hostovi su direktno povezani na *switch*
- Switchevi baferuju frejmove
- Ethernet protokol se koristi na interfejsima ali nema kolizije zbog full duplexa
 - Svaki link je poseban kolizioni 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)

6: Nivo linka 6-59

59

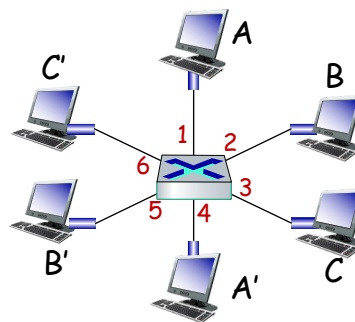
Tabela prosleđivanja switch-a

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?

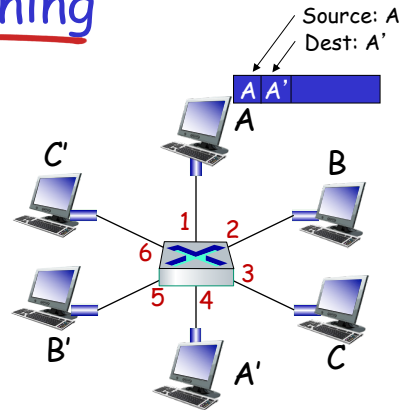


6: Nivo linka 6-60

60

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)*

6: Nivo linka 6-61

61

Switch: filtriranje/prosleđivanje frejma

Kada switch primi frejm:

Indeksira tabelu prosleđivanja koristeći MAC destinacionu adresu

```

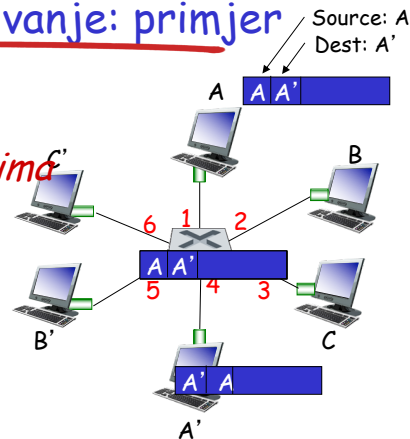
if je sadržaj pronađen za destinaciju
then{
  if destinacija na mreži sa koje je došao frejm
  then odbaci frejm
  else proslijedi frejm na odgovarajući interfejs
}
else šalji na sve interfejse, osim na onaj odakle je
frejm stigao
  
```

6: Nivo linka 6-62

62

Self-learning, prosleđivanje: primjer

- Destinacija frejma, A', nepoznata: *Šalji svima*
- Destinacija frejma A: poznata
selektivno šalji na jedan link



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

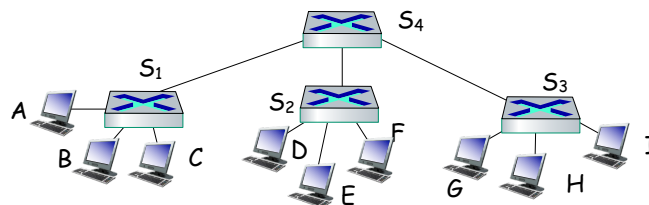
Tabela

6: Nivo linka 6-63

63

Povezivanje switcheva

- Switchevi 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!)

6: Nivo linka 6-64

64

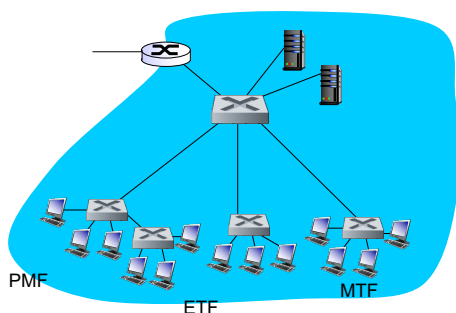
Nivo linka

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

6: Nivo linka 6-65

65

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,...

6: Nivo linka 6-66

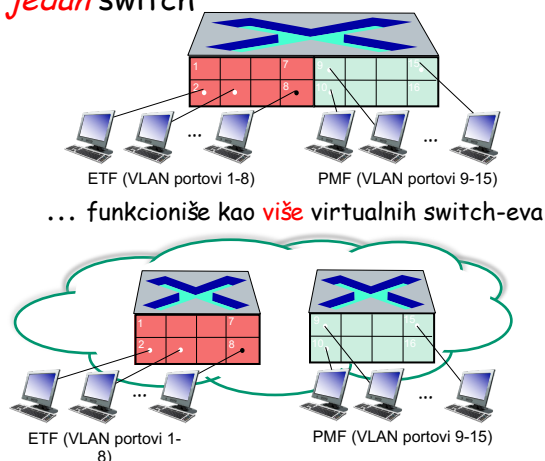
66

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

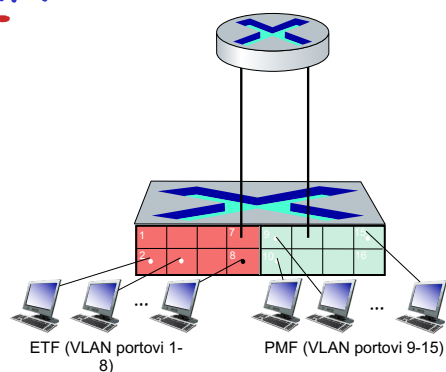


6: Nivo linka 6-67

67

Port bazirani VLAN

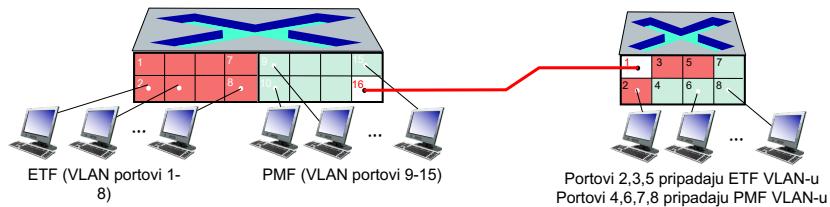
- **Izolacija saobraćaja:** frejmovi od/do portova 1-8 mogu doseći samo portove 1-8
 - Postoji i VLAN baziran na MAC adresama
- **Dinamička pripadnost:** portovi se dinamički mogu dodjeljivati VLANovima
- **Prosleđivanje između VLAN-ova:** preko rutera (baš kao komutatori iz različitih mreža)
 - L3 komutator



6: Nivo linka 6-68

68

VLAN preko više switch-eva

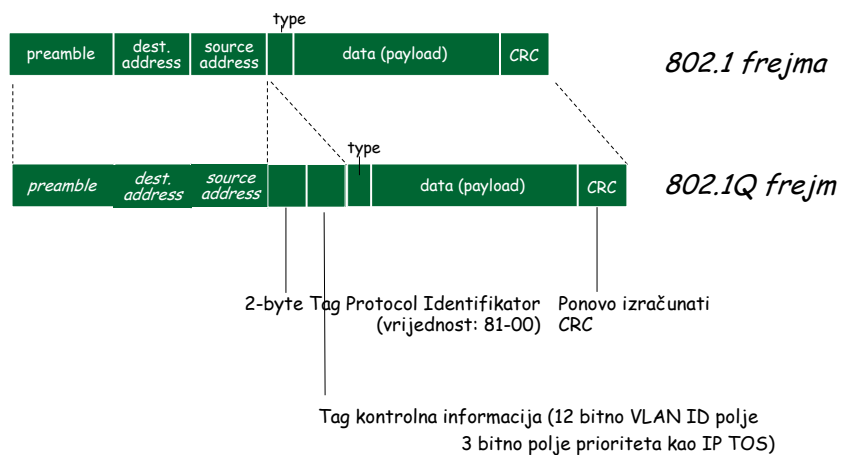


- **trunk port:** prenosi frejmove između VLAN-ova definisanih na više switch-eva
 - Frejmovi jednog VLAN-a koji se prenose između switch-eva moraju nositi VLAN identifikator
 - 802.1q protokol dodaje i uklanja dodatna polja u zaglavlju frejma koji se prenose preko trunk portova

6: Nivo linka 6-69

69

802.1Q VLAN format frejma



6: Nivo linka 6-70

70

Nivo linka

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

6: Nivo linka 6-71

71

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.

6: Nivo linka 6-72

72

Elementi bežične računarske mreže



6: Nivo linka 6-73

73

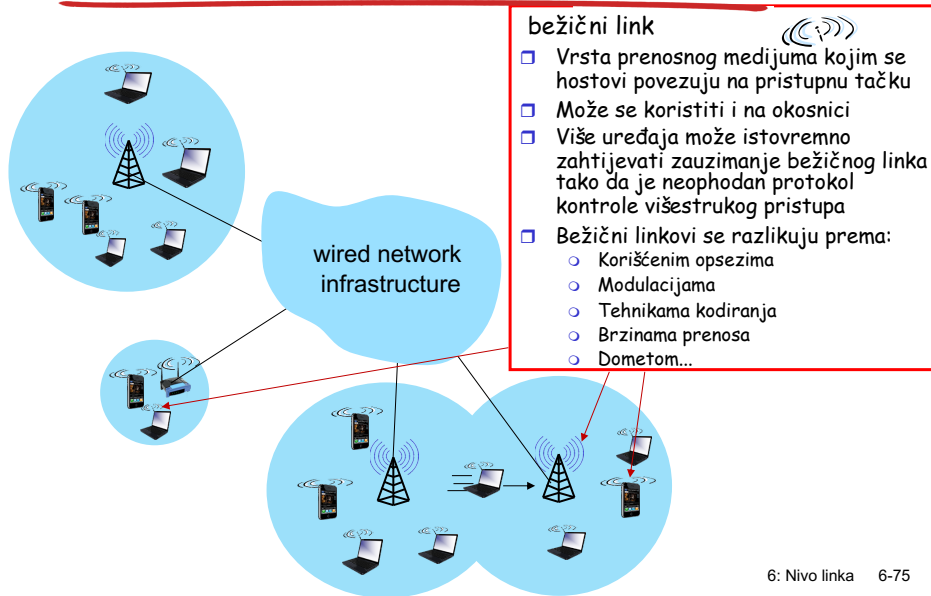
Elementi bežične mreže



6: Nivo linka 6-74

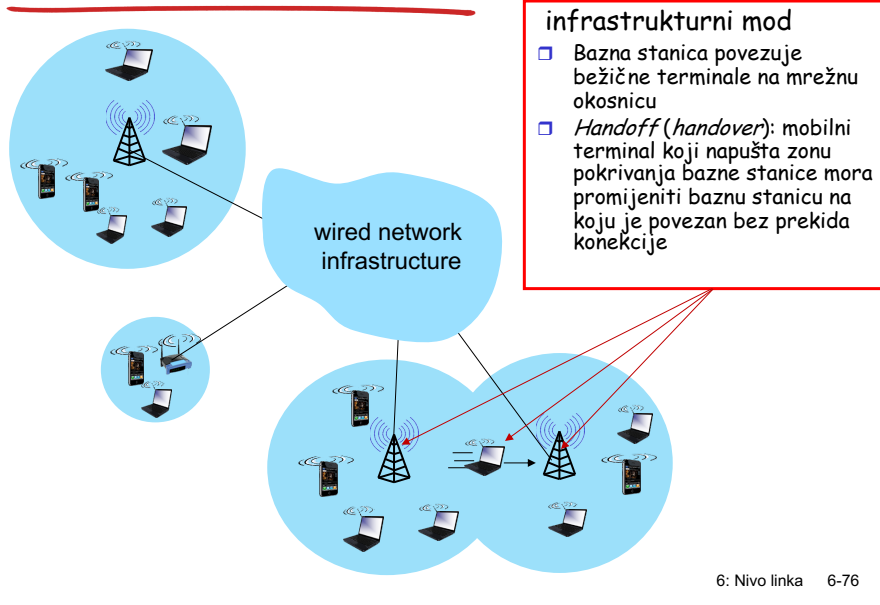
74

Elementi bežične računarske mreže



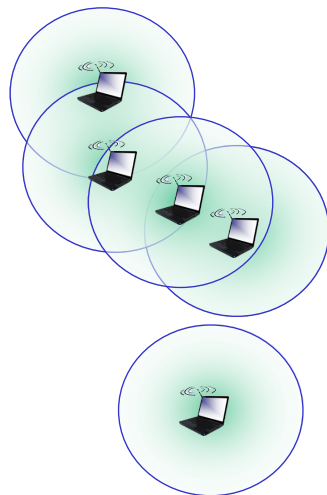
75

Elementi bežične mreže



76

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

6: Nivo linka 6-77

77

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 mreža</i>
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

6: Nivo linka 6-78

78

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!!!!!!!!!!!!

6: Nivo linka 6-79

79

IEEE 802.11 Wireless LAN (WLAN, WiFi) standardi

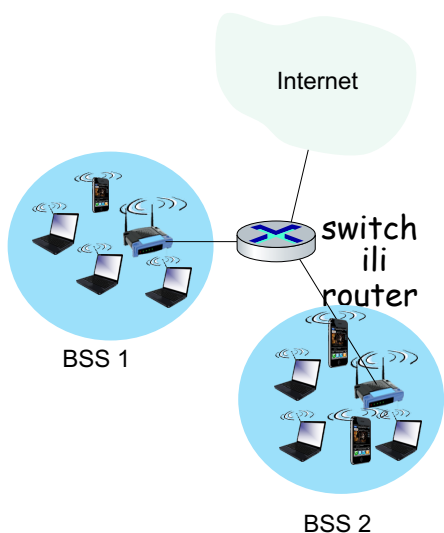
IEEE 802.11 standard	Godina	Maksimalna brzina	Domet	Frekvencijski opseg
802.11b	1999	11 Mb/s	30 m	2.4 GHz
802.11g	2003	54 Mb/s	30m	2.4 GHz
802.11n (WiFi 4)	2009	600 Mb/s	70m	2.4 i 5 GHz
802.11ac (WiFi 5)	2013	3.47Gb/s	70m	5 GHz
802.11ax (WiFi 6)	2020 (exp.)	14 Gb/s	70m	2.4, 5 GHz
802.11af	2014	35 - 560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

6: Nivo linka 6-80

80

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

6: Nivo linka 6-81

81

802.11 kanali

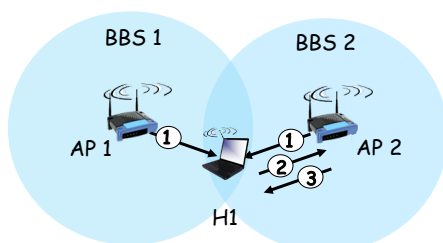
- Spektar je podijeljen na kanale različitih frekvencija
 - Administrator AP bira frekvenciju na kojoj će raditi AP
 - Moguća je interferencija zato što kanal već može biti izabran na susjednoj AP
- Host se mora povezati na AP
 - Skenira kanale, tražeći *beacon* frejmove koji sadrže ime AP (SSID) i njegovu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



6: Nivo linka 6-82

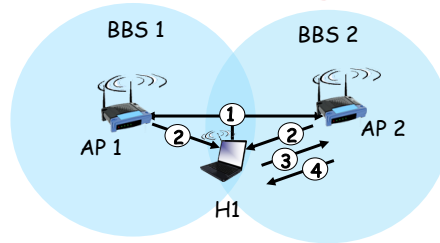
82

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:

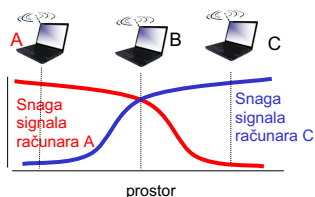
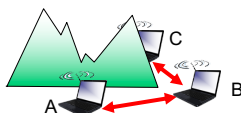
- (1) Host šalje *Probe Request* frejm svim prisutnim AP
- (2) AP šalju *Probes response* frejm
- (3) Host šalje izabranom AP *Association Request* frejm
- (4) Izabrani AP šalje *Association Response* frejm hostu

6: Nivo linka 6-83

83

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)



6: Nivo linka 6-84

84

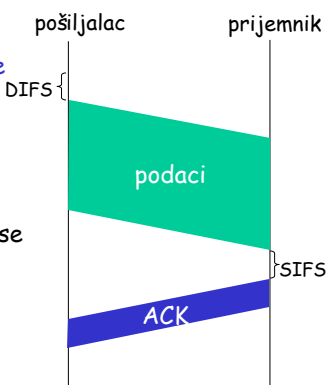
IEEE 802.11 MAC Protokol: CSMA/CA

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



6: Nivo linka 6-85

85

Izbjegavanje kolizije (više)

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

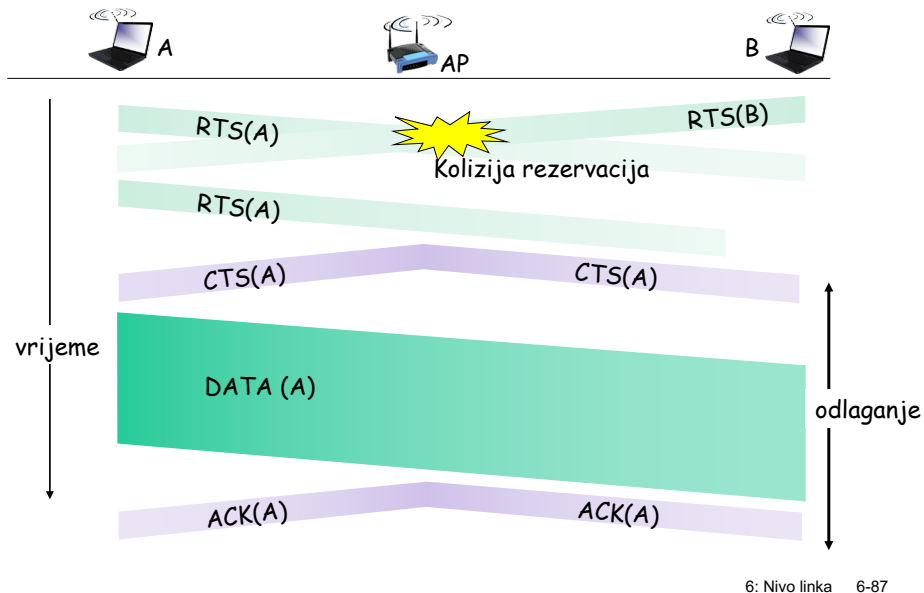
- Pošiljalac prvo šalje mali *request-to-send* (RTS) frejm pristupnoj tački korišćenjem CSMA
 - RTS frejmovi mogu zapasti u koliziju sa drugim frejmovima (što nije veliki problem jer su kratki)
- Pristupna tačka šalje svima *clear-to-send* CTS frejm kao odgovor na RTS frejmove
- CTS frejm primaju sva 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 !

6: Nivo linka 6-86

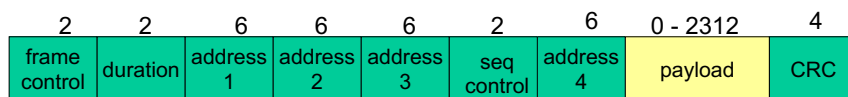
86

Izbjegavanje kolizije: razmjena RTS-CTS



87

802.11 frejm: adresiranje



Adresa 1: MAC adresa bežičnog hosta ili AP kojem je namijenjen frejm

Adresa 2: MAC adresa bežičnog hosta ili AP koji šalje frejm

Adresa 3: MAC adresa interfejsa uređaja okosnice na koji je AP povezan

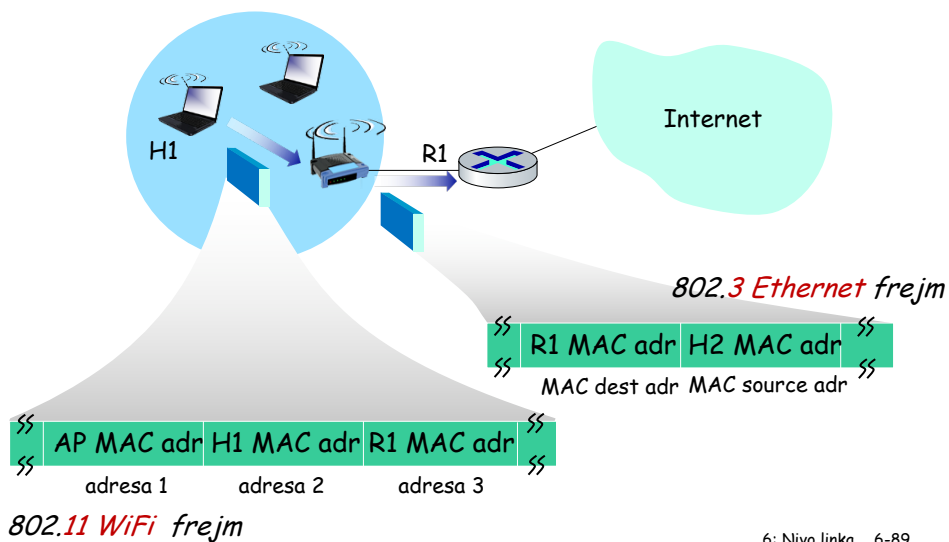
Adresa 4: samo se koristi u ad hoc modu

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

6: Nivo linka 6-88

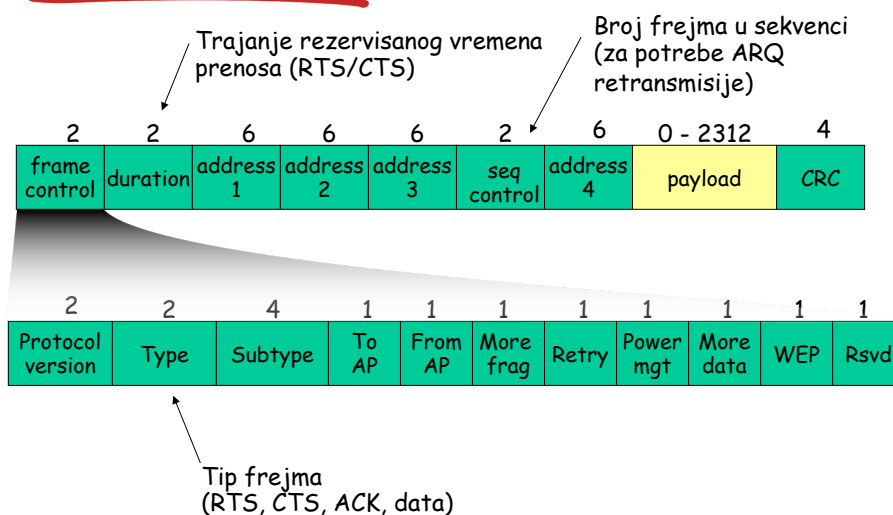
88

802.11 frejm: adresiranje



89

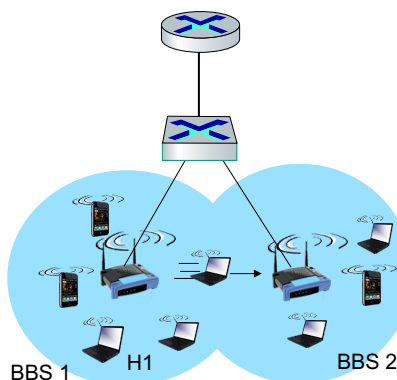
802.11 frejm



90

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



6: Nivo linka 6-91

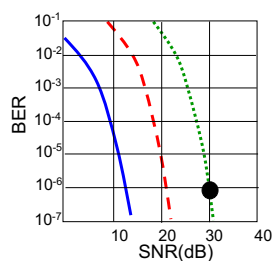
91

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

..... QAM256 (8 Mb/s)
 --- QAM16 (4 Mb/s)
 --- BPSK (1 Mb/s)
 ● Tačka funkcionisanja



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

6: Nivo linka 6-92

92

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

6: Nivo linka 6-93

93

Nivo linka

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

6: Nivo linka 6-94

94

Mreža datacentra

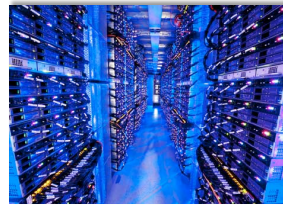
Mreže datacentara

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



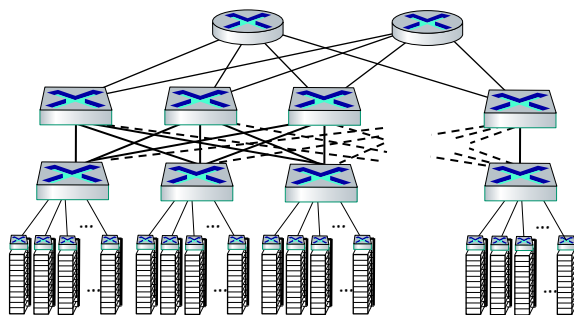
Microsoft container, data centar u Čikagu

6: Nivo linka 6-95

95

Mreža datacentra

Mrežni elementi



Border ruteri

- Povezivanje sa okruženjem

Tier-1 switch-evi

- Povezivanje Tier-2 switch-eva

Tier-2 switch-evi

- Povezivanje TOR switch-eva

Top of Rack (TOR) switch

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

Server rekovi

- 20- 40 blade -servera: hostova

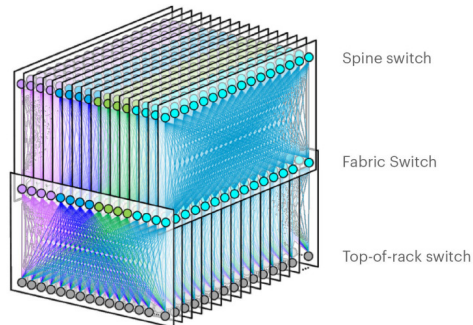
6: Nivo linka 6-96

96

Mreža datacentra

Mrežni elementi

Mrežna topologija Facebook F16 data centra



<https://engineering.fb.com/data-center-engineering/f16-minipack/> (posted 3/20

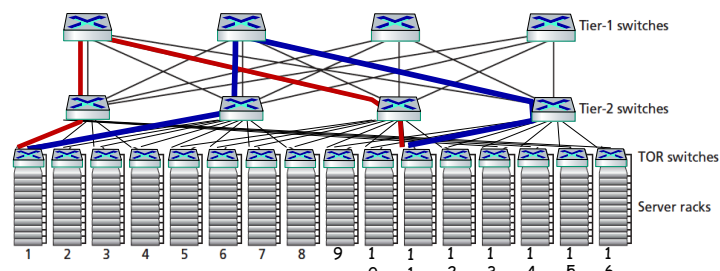
6: Nivo linka 6-97

97

Mreža datacentra

Mrežni elementi

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



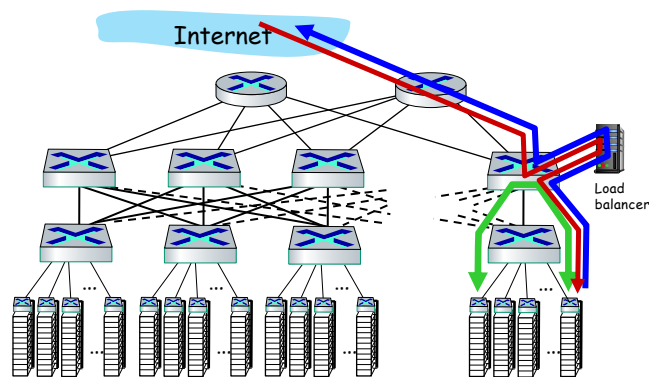
dva razdvojena puta rekova 1 i 11

6: Nivo linka 6-98

98

Mreža datacentra

Rutiranje nivoa aplikacije



Balanser opterećenja: rutiranje nivoa aplikacije

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

6: Nivo linka 6-99

99

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)
 - Experimentisanje sa hop-by-hop (backpressure) kontrolom zagušenja
- rutiranje, menadžment:
 - 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

6: Nivo linka 6-100

100

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. Mreža data centra

Nivo linka 101