

## 4. Ethernet

Prof.dr Igor Radusinović

igorr@ucg.ac.me

dr Slavica Tomović

slavicat@ucg.ac.me

1

## Ethernet

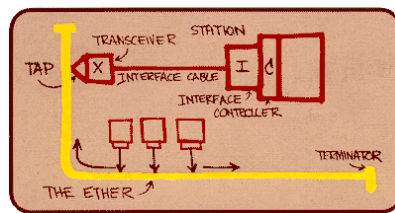
- Uvod
- Struktura frejma
- Standardi
- Detekcija greške
- MAC kontrola
- Switch

2

# Ethernet

## Uvod

- 1973-1976
- "dominantna" žična LAN tehnologija
- nekoliko € za 1Gb/s!
- Prva široko korišćena LAN tehnologija
- Jednostavnija, jeftinija od token LANova i ATM
- Familija standarda
- Široki opseg brzina prenosa: 10 Mb/s - 400 Gb/s



Metcalfova skica Ethernet

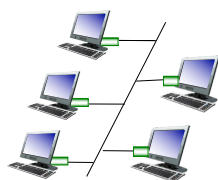
Telekomunikacione mreže 4-3

3

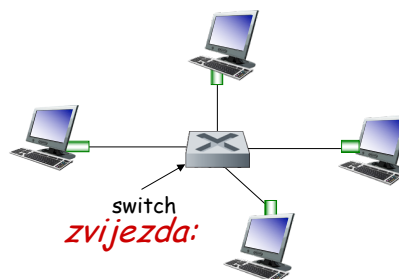
# Ethernet

## Uvod

- *magistrala*: bila je popularna sredinom devedesitih
  - Sva čvorišta su u istom kolizionom domenu
- *zvijezda*: preovlađuje danas
  - aktivni *switch* u centru
  - Svaki link switcha posebni kolizioni domeni
    - Bakarna upredena parica
    - Optičko vlakno
    - ...



*magistrala*: koaksijalac



switch  
*zvijezda*:

Telekomunikacione mreže 4-4

4

# Ethernet

## Uvod

- ❑ Nekonektivan: Nema *konekcije* 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 popunjavaju drugi protokoli ako je to potrebno
  - u suprotnom, aplikacija će vidjeti praznine
- ❑ CSMA/CD sa eksponencijalnim backoff-om MAC kontrola

# Ethernet

## Struktura frejma

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



### *Preamble:*

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

# Ethernet

## Struktura frejma

### 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

### Tip(2B):

- ukazuje na protokol nivoa mreže (najčešće IPv4 (0800) i IPv6 (86DD), ali nekad i Novell IPX i AppleTalk)

### CRC(4B):

- provjera na prijemu, ako je detektovana greška, frejm se odbacuje (CCITT-32 CRC)

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

tip



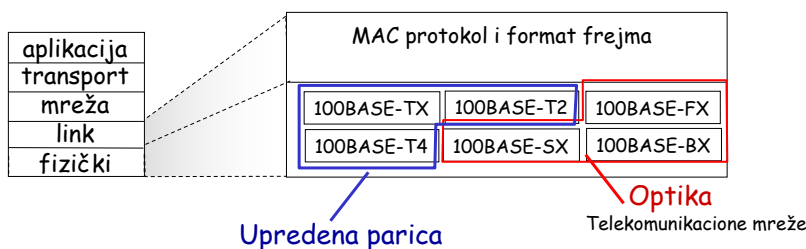
Telekomunikacione mreže 4-7

7

# Ethernet

## Standardi

- IEEE 802.3 radna grupa
- Pokrivaju fizički nivo i nivo linka
- zajednički MAC protokol i format frejma
- Različite brzine: 2 Mb/s, 10 Mb/s, 100 Mb/s, 1Gb/s, 2,5Gb/s, 5Gb/s, 10Gb/s, 40Gb/s, 50Gb/s, 100Gb/s, 200Gb/s i 400Gb/s
- Različiti medijumi za prenos: optičko vlakno, upredena parica,...
- Lista standarda se može naći na <https://ieeexplore.ieee.org/browse/standards/get-program/page/series?id=68>
- IEEE 802.3-2018



8

## Ethernet

### Detekcija greške

- ❑ Telekomunikacioni sistemi unose grešku
- ❑ Aplikacije zahtijevaju određeni nivo pouzdanosti
  - Aplikacije prenosa podataka zahtijevaju prenos bez greške
  - Govor & video aplikacije tolerišu određeni nivo greške
- ❑ Kontrola greške se koristi kada prenosni sistem ne zadovoljava zahtjeve aplikacije
- ❑ Kontrola greške obezbjeđuje da se podaci do određenog nivoa prenoše bez greške
- ❑ Dva osnovna principa:
  - *Detekcija greške & retransmisija* (ARQ)
  - "*Forward error correction*" (FEC)
- ❑ Najčešće se realizuje na nivoima linka i transporta

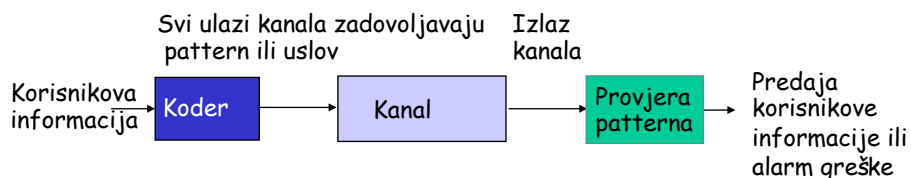
Telekomunikacione mreže 4-9

9

## Ethernet

### Detekcija greške

- ❑ Svi prenošeni blokovi podataka ("kodne riječi") treba da zadovoljavaju šablon (pattern)
- ❑ Ako primljeni blok ne zadovoljava šablon, znači da se pojavila greška
- ❑ Redundansa: Samo podskup svih mogućih blokova može biti kodna riječ
- ❑ Problem nastaje kada kanal transformiše kodnu riječ u drugu kodnu riječ!!!!!!

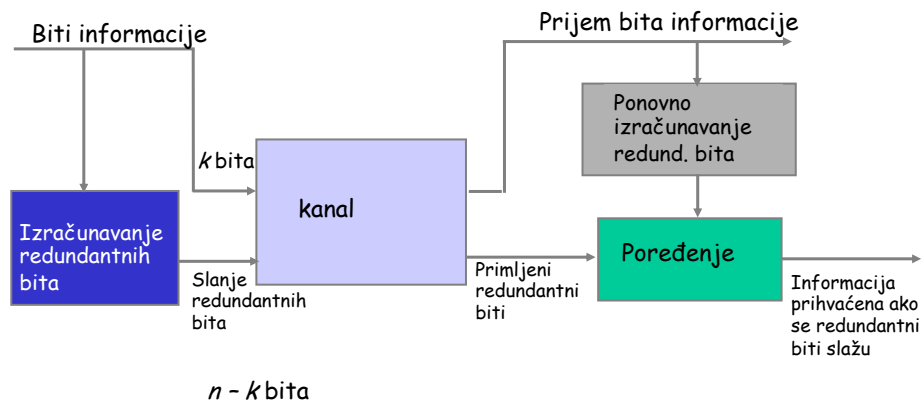


Telekomunikacione mreže 4-10

10

## Ethernet

### Detekcija greške



Telekomunikacione mreže 4-11

11

## Ethernet

### Detekcija greške

- ❑ Ciklična provjera redundanse (Cyclic Redundancy Check)
- ❑ Koriste se polinomi i aritmetika polinoma
- ❑ Implementiraju se korišćenjem kola sa pomjerskim registrima
- ❑ Ovi kodovi predstavljaju odličnu bazu za realizaciju moćnih metoda za korekciju greške
- ❑ Originalnoj poruci odgovara polinom koji se dijeli sa generišućim polinomom. Ostatak pri dijeljenju se upisuje u CRC polje.
- ❑ Na prijemu se polinom koji odgovara primljenoj poruci dijeli generišućim polinomom. Ostatak pri dijeljenju se upoređuje sa sadržajem CRC polja. Ako nema razlika prenos je bio uspješan.
- ❑ Ovi kodovi se zovu još i polinomijalni kodovi.

Telekomunikacione mreže 4-12

12

## Ethernet

### Detekcija greške

Binarni vektor se mapira u polinome

$$(i_{k-1}, i_{k-2}, \dots, i_2, i_1, i_0) \rightarrow i_{k-1}x^{k-1} + i_{k-2}x^{k-2} + \dots + i_2x^2 + i_1x + i_0$$

Sabiranje:

$$\begin{aligned} (x^7 + x^6 + 1) + (x^6 + x^5) &= x^7 + x^6 + x^6 + x^5 + 1 \\ &= x^7 + (1+1)x^6 + x^5 + 1 \\ &= x^7 + x^5 + 1 \quad \text{jer je } 1+1=0 \text{ mod } 2 \end{aligned}$$

Množenje:

$$\begin{aligned} (x+1)(x^2+x+1) &= x(x^2+x+1) + 1(x^2+x+1) \\ &= x^3 + x^2 + x + x^2 + x + 1 \\ &= x^3 + 1 \end{aligned}$$

## Ethernet

### Detekcija greške

Dijeljenje polinoma

$$\begin{array}{r} x^6 + x^5 : \quad x^3 + x + 1 = x^3 + x^2 + x \\ \text{djelilac} \quad \begin{array}{r} x^6 + \quad x^4 + x^3 \\ \hline x^5 + x^4 + x^3 \\ \quad x^5 + \quad x^3 + x^2 \\ \quad \hline \quad x^4 + \quad x^2 \\ \quad \quad x^4 + \quad x^2 + x \\ \quad \quad \hline \quad \quad \quad x \end{array} \\ \hline x = r(x) \text{ ostatak} \end{array}$$

*Napomena: Stepen  $r(x)$  je manji nego stepen djelioca*

# Ethernet

## Detekcija greške

Kod ima binarni generišući polinom stepena  $n-k$

$$g(x) = x^{n-k} + g_{n-k-1}x^{n-k-1} + \dots + g_2x^2 + g_1x + 1$$

$k$  informacionih bita definiše polinom stepena  $k-1$

$$i(x) = i_{k-1}x^{k-1} + i_{k-2}x^{k-2} + \dots + i_2x^2 + i_1x + i_0$$

Cilj je pronaći polinom ostatka sa stepenom reda  $n-k-1$  (maksimalno) tako da je

$$x^{n-k}i(x) = q(x)g(x) + r(x)$$

Definiše se polinom kodne riječi stepena  $n-1$

$$b(x) = \underbrace{x^{n-k}i(x)}_{n \text{ bita}} + \underbrace{r(x)}_{n-k \text{ bita}}$$

Telekomunikacione mreže 4-15

15

# Ethernet

## Detekcija greške

Primjer:  $k=4, n=7$

Generišući polinom:  $g(x) = x^3 + x + 1$

Informacija: (1,1,0,0)  $i(x) = x^3 + x^2$

Kodiranje:  $x^3i(x) = x^6 + x^5$

$$\begin{array}{r}
 x^3 + x + 1 \overline{) x^6 + x^5} \\
 \underline{x^6 + \phantom{x^5} + x^4 + x^3} \\
 x^5 + x^4 + x^3 \\
 \underline{x^5 + \phantom{x^4} + x^3 + x^2} \\
 x^4 + x^2 \\
 \underline{x^4 + \phantom{x^2} + x} \\
 x
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 1011 \overline{) 1100000} \\
 \underline{1011} \\
 1110 \\
 \underline{1011} \\
 1010 \\
 \underline{1011} \\
 010
 \end{array}$$

Prenošena kodna riječ:

$$b(x) = x^6 + x^5 + x$$

$$\Rightarrow \underline{b} = (1,1,0,0,0,1,0)$$

Telekomunikacione mreže 4-16

16



## Ethernet

### Detekcija greške

Sve kodne riječi zadovoljavaju sledeći **pattern**:

$$b(x) = x^{n-k}i(x) + r(x) = q(x)g(x) + r(x) + r(x) = q(x)g(x)$$

Sve kodne riječi su multipli od  $g(x)$ !!!!!!

Prijemnik dijeli primljene  $n$ -torke sa  $g(x)$  i provjerava da li je ostatak nula

Ako ostatak nije nula, tada primljena  $n$ -toraka nije kodna riječ

## Ethernet

### Detekcija greške

#### Implementacija pomjeračkog registra

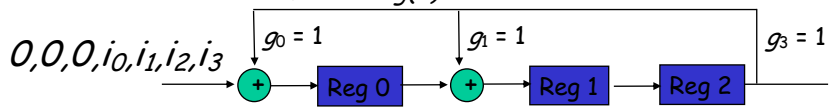
1. Prijem informacionih bita  $i_{k-1}, i_{k-2}, \dots, i_2, i_1, i_0$
2. Dodavanje  $n - k$  nula informacionim bitima
3. Uvođenje sekvence u kolo pomjeračkog registra koje obavlja dijeljenje polinoma
4. Poslije  $n$  shift-ova, pomjerački registar sadrži ostatak

# Ethernet

## Detekcija greške

Kolo za dijeljenje

Koder za  $g(x) = x^3 + x + 1$



Clock	Ulaz	Reg 0	Reg 1	Reg 2
0	-	0	0	0
1	1 = $i_3$	1	0	0
2	1 = $i_2$	1	1	0
3	0 = $i_1$	0	1	1
4	0 = $i_0$	1	1	1
5	0	1	0	1
6	0	1	0	0
7	0	0	1	0
Biti provjere:		$r_0 = 0$	$r_1 = 1$	$r_2 = 0$

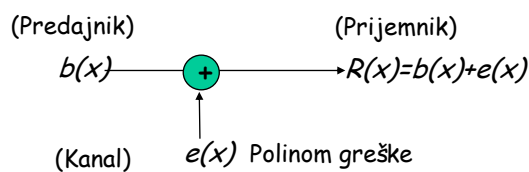
$\implies r(x) = x$

19

# Ethernet

## Detekcija greške

Greške koje se ne mogu detektovati



- $e(x)$  ima jedinice na mjestima greške, a nule na drugim mjestima
- Prijemnik dijeli primljeni polinom  $R(x)$  sa  $g(x)$
- Problem: ako je  $e(x)$  multipl od  $g(x)$ , i kodna riječ različita od nule tada
 
$$R(x) = b(x) + e(x) = q(x)g(x) + q'(x)g(x)$$
- Skup grešaka koje se ne mogu detektovati je skup nenultih polinoma.

20

## Ethernet

### Detekcija greške

#### Dobri polinomijalni kodovi

- Treba izabrati generišući polinom tako da najvjerovatniji oblici greške ne budu multipli od  $g(x)$
- *Detektovanje pojedinačnih grešaka*
  - $e(x) = x^i$  za grešku na  $i + 1$  bitu
  - Ako  $g(x)$  ima više od jednog člana ne može dijeliti  $x^i$  bez ostatka
- *Detektovanje dvostrukih grešaka*
  - $e(x) = x^i + x^j = x^i(x^{j-i} + 1)$  gdje je  $j > i$
  - Ako  $g(x)$  ima više od jednog člana, ne može dijeliti  $x^i$  bez ostatka
  - Ako je  $g(x)$  prost polinom, ne može dijeliti  $x^m + 1$  bez ostatka za svako  $m \leq 2^{n-k} - 1$  (Potrebno je obezbijediti da kodna riječ bude manja od  $2^{n-k} - 1$ )
  - Prosti polinomi se mogu naći uz konsultaciju knjiga iz teorije kodova

## Ethernet

### Detekcija greške

#### Dobri polinomijalni kodovi

- *Detekcija neparnog broja grešaka*
  - Pretpostavimo da polinomi kodnih riječi imaju paran broj jedinica, tada sve greške sa neparnim brojem pogrešnih bita se lako detektuju
  - Takođe,  $b(x)$  za  $x = 1$  je 0 jer  $b(x)$  ima paran broj jedinica
  - To znači da  $x + 1$  mora biti faktor za svaki  $b(x)$
  - Treba odabrati  $g(x) = (x + 1)p(x)$  gdje je  $p(x)$  prost polinom

## Ethernet

### Detekcija greške

Standardni generišući polinomi

❑ **CRC-8:**

$$= x^8 + x^2 + x + 1$$

ATM

❑ **CRC-16:**

$$= x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$$
$$= (x + 1)(x^{15} + x + 1)$$

Bisync

❑ **CCITT-16:**

$$= x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$$

HDLC, XMODEM, V.41

❑ **CCITT-32:**

IEEE 802, DoD, V.42

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

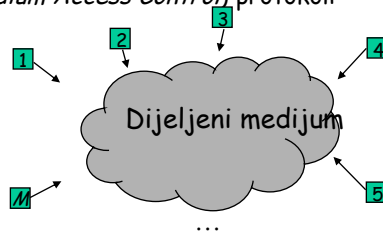
Telekomunikacione mreže 4-23

23

## Ethernet

### MAC kontrola

- ❑ Dijeljenje linkova je ključna karakteristika telekomunikacionih mreža
  - Niska cijena
  - Radio, koaksijalac, bakarna parica, optika,...
  - M korisnika šalju podatke na medijum
- ❑ Ključno pitanje: Kako dijeliti medijum?
  - MAC (*Medium Access Control*) protokoli

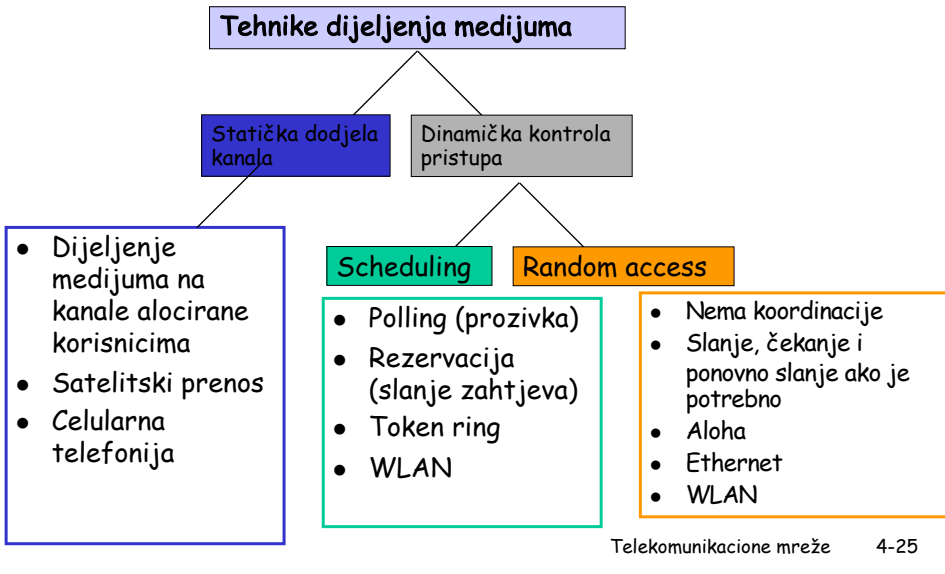


Telekomunikacione mreže 4-24

24

# Ethernet

## MAC kontrola

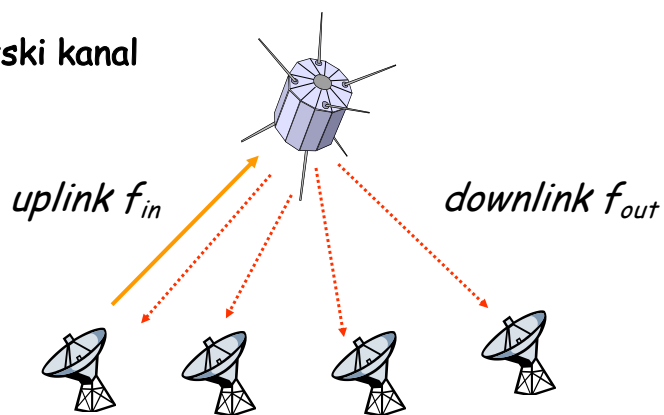


25

# Ethernet

## MAC kontrola

### Satelitski kanal



Telekomunikacione mreže 4-26

26

# Ethernet

## MAC kontrola

### Celularne mreže



uplink  $f_1$ ; downlink  $f_2$

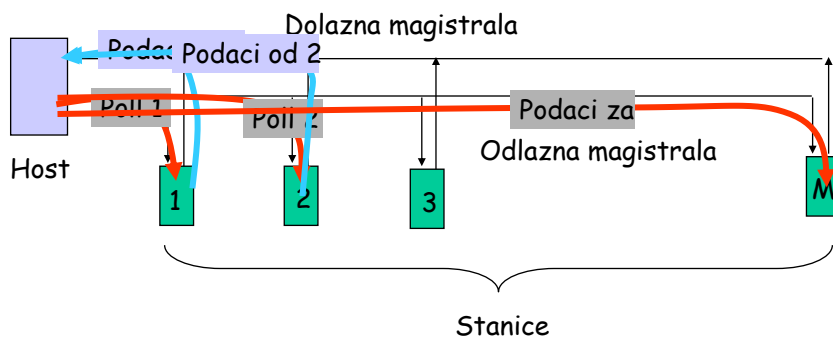
uplink  $f_3$ ; downlink  $f_4$

27

# Ethernet

## MAC kontrola

### Scheduling: Polling

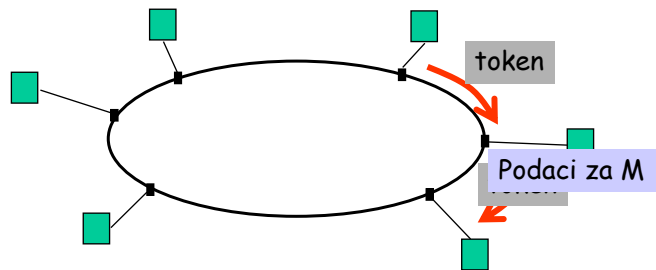


28

## Ethernet MAC kontrola

### Scheduling: Token Passing

Prsten mreža



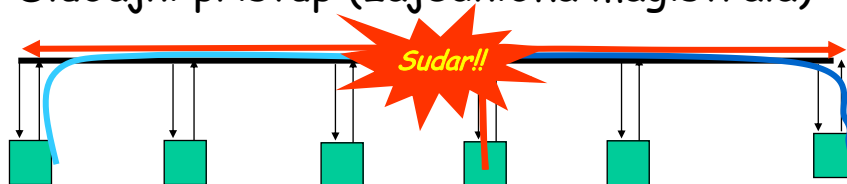
Stanica koja posjeduje token šalje podatke

Telekomunikacione mreže 4-29

29

## Ethernet MAC kontrola

### Slučajni pristup (zajednička magistrala)



Stanica šalje kada ima podatke za slanje i  
kada je medijum slobodan  
Istovremeni prenos podatka se može desiti;  
potreban je mehanizam retransmisije

Telekomunikacione mreže 4-30

30

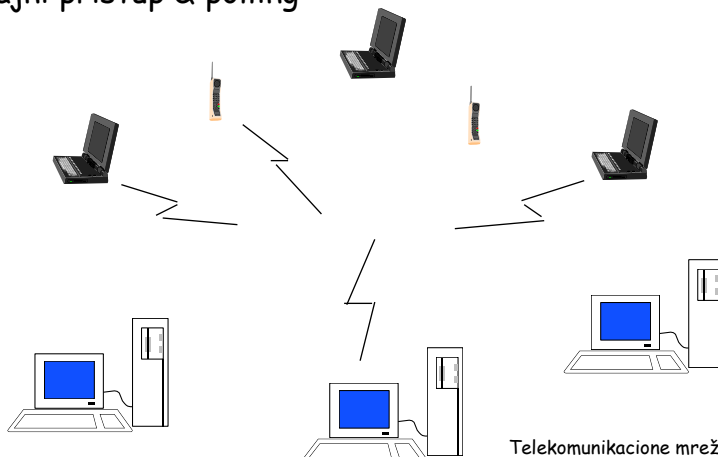
## Ethernet

### MAC kontrola

AdHoc: od stanice do stanice

Infrastrukturna konfiguracija: prenos preko bazne stanice

Slučajni pristup & polling



31

## Ethernet

### MAC kontrola

#### Izbor MAC kontrole

##### □ Aplikacije

- O kojem se tipu saobraćaja radi?
- Govorni tokovi? Ravnomjerni saobraćaj, nizak nivo kašnjenja i varijacije kašnjenja
- Podaci? Kratke poruke? Web stranice?
- Podaci kompanija ili rezidencijalnih korisnika? Pouzdanost, troškovi

##### □ Brojke

- Koliko se može preneti saobraćaja?
- Koliko korisnika se može opslužiti?

##### □ Ključni parametar je proizvod brzine prenosa i kašnjenja

- Koordinacija dijeljenog medijuma podrazumijeva zauzimanje dijela kapaciteta (eksplicitno ili implicitno)
- Složenost koordinacije je proporcionalna proizvodu kašnjenja i kapaciteta

##### □ Jednostavan primjer dvije stanice

- Stanica koja želi da pošalje frejm osluškuje medijum i šalje frejm kada je medijum slobodan
- Stanica nadzire medijum radi detekcije kolizije
- Ako se kolizija pojavi, potrebna je retransmisija

Telekomunikacione mreže 4-32

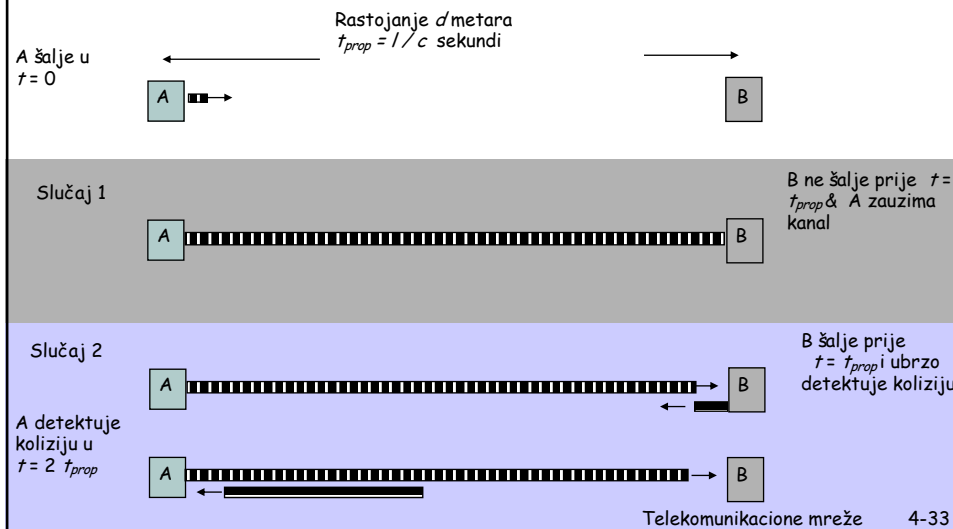
32



# Ethernet

## MAC kontrola

### Primjer MAC dvije stanice



33

# Ethernet

## MAC kontrola

### Efikasnost MAC dvije stanice

- Prenos svakog frejma zahtijeva  $2 t_{prop}$  "tišine"
  - Stanica B mora biti pasivna  $t_{prop}$  prije i poslije trenutka kada Stanica A počine da šalje
  - $R$  brzina prenosa
  - Frejm veličine  $L$  bita

$$\text{Efektivna propusnost} = R_{eff} = \frac{L}{L/R + 2t_{prop}} = \frac{1}{1 + 2a} R \text{ b/s}$$

$$\text{Efikasnost} = \rho_{max} = \frac{R_{eff}}{R} = \frac{L}{L + 2t_{prop}R} = \frac{1}{1 + 2t_{prop}R/L} = \frac{1}{1 + 2a}$$

Normalizovani proizvod kašnjenja i kapaciteta

$$a = \frac{t_{prop}}{L/R}$$

← Kašnjenje uslijed propagacije

← Kašnjenje uslijed prenosa frejma

Telekomunikacione mreže 4-34

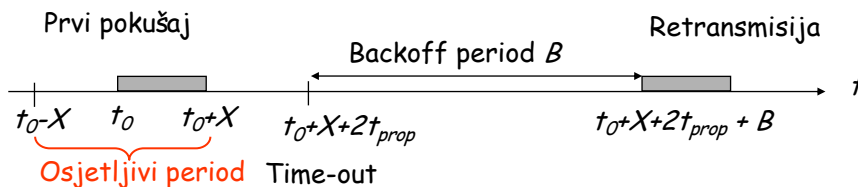
34

## Ethernet

### MAC kontrola

#### Aloha

- Bežični link namijenjen povezivanju glavnog i udaljenih kampusa Univerziteta Havaji
- Najjednostavnije rješenje: samo pokušaj
  - Stanica šalje kad god ima šta da šalje
  - Istovremeni prenos više stanica izaziva koliziju
  - Ako se ACK ne pojavi tokom timeout perioda stanica bira proizvoljan backoff interval i obavlja retransmisiju



Telekomunikacione mreže 4-35

35

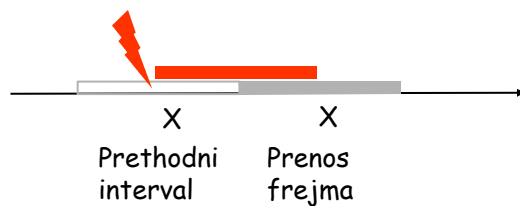
## Ethernet

### MAC kontrola

#### Aloha

- Definicije i pretpostavke
  - $X$  vrijeme prenosa frejma (konstantna veličina)
  - $S$ : propusnost (srednji broj uspješno prenesenih frejmova tokom  $X$  sekundi)
  - $G$ : opterećenje (srednje broj pokušaja tokom intervala  $X$ )
  - $P_{uspjeh}$ : vjerovatnoća uspješnog prenosa

$$S = GP_{uspjeh}$$



- Svaki prenos koji počne tokom osjetljivog perioda izaziva koliziju
- Uspješan prenos se javlja kada tokom intervala  $2X$  nema pokušaja prenosa

Telekomunikacione mreže 4-36

36

# Ethernet

## MAC kontrola

### Aloha

- Koliko iznosi vjerovatnoća da tokom osjetljivog perioda nema dolazaka?
- Abramsonova pretpostavka: Efekat backoff algoritma je da su dolasci frejmova jednakovjerovatni u svakom intervalu
- $G$  je srednji broj dolazaka u intervalu  $X$
- $X$  se podijeli na  $n$  intervala trajanja  $\Delta = X/n$
- $p =$  vjerovatnoća dolaska u intervalu  $\Delta$ , tada je

$$G = n p$$

$$\begin{aligned} P_{\text{uspjeh}} &= P[0 \text{ dolazaka u intervalu } 2X] = \\ &= P[0 \text{ dolazaka u } 2n \text{ intervala}] \\ &= (1-p)^{2n} = \left(1 - \frac{G}{n}\right)^{2n} \rightarrow e^{-2G} \text{ kada } n \rightarrow \infty \end{aligned}$$

Telekomunikacione mreže 4-37

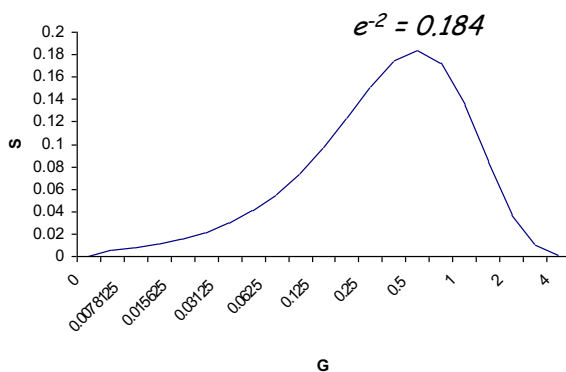
37

# Ethernet

## MAC kontrola

### Aloha

$$S = GP_{\text{uspjeh}} = Ge^{-2G}$$



- Kolizije su sredstvo koordinacije
- Maksimalna propusnost je  $\rho_{\text{max}} = 1/2e$  (18.4%)
- Dvostruko ponašanje:  
Malo  $G$ ,  $S \approx G$   
Veliko  $G$ ,  $S \downarrow 0$
- Moguća je lavina kolizija koje obaraju propusnost na nulu

Telekomunikacione mreže 4-38

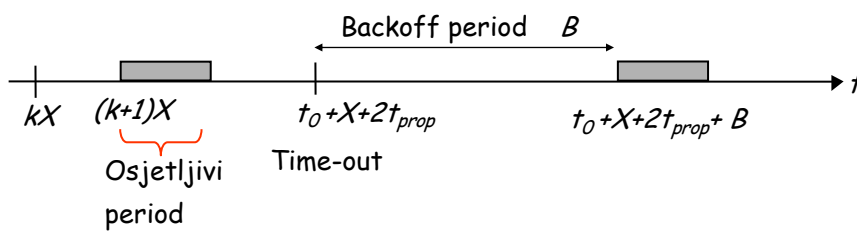
38

# Ethernet

## MAC kontrola

### Slotted Aloha

- Vrijeme je podijeljena na slotove trajanja  $X$  sekundi
- Stanice su sinhronizovane
- Stanice prenose frejmove u prvom vremenskom slotu koji dolazi nakon pristizanja podataka za slanje
- Backoff intervali su trajanja cijelog broja slotova



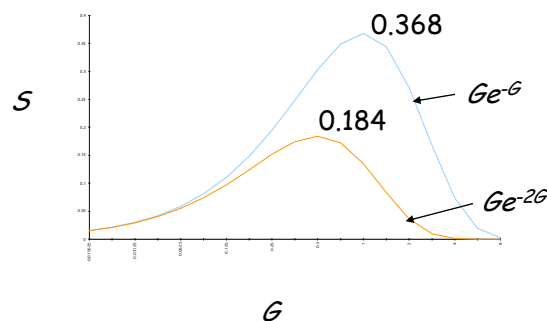
*Samo frejmovi koji krenu tokom intervala  $X$  izazivaju koliziju.*

# Ethernet

## MAC kontrola

### Slotted Aloha

$$\begin{aligned}
 S &= GP_{\text{uspjeh}} = GP[\text{nema dolazaka u } X \text{ sekundi}] \\
 &= GP[\text{nema dolazaka u } n \text{ intervala}] \\
 &= G(1-p)^n = G\left(1 - \frac{G}{n}\right)^n \rightarrow Ge^{-G}
 \end{aligned}$$



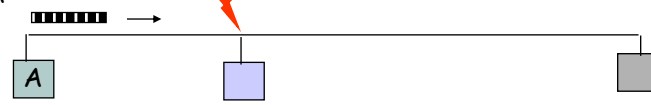
## Ethernet

### MAC kontrola

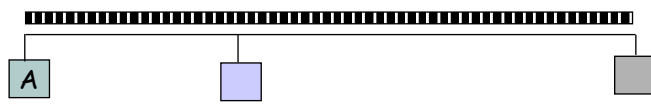
#### Carrier Sensing Multiple Access (CSMA)

- Stanica osluškuje kanal prije početka slanja
  - Ako je zauzet, ili čeka da se medijum oslobodi ili odlaže slanje (različite opcije)
  - Ako je slobodan, počinje slanje
  - **Osjetljivi period je smanjen na  $t_{prop}$**  (zbog efekta zauzimanja kanala)
  - Kada se pojavi kolizija ona pokriva čitavo trajanje frejma
  - Ako je  $t_{prop} > X$  (ili ako je  $\alpha > 1$ ), nema poboljšanja u odnosu na ALOHA ili slotted ALOHA

Stanica A  
počinje da  
šalje u  $t = 0$



Stanica A  
zauzima kanal u  
 $t = t_{prop}$



Telekomunikacione mreže 4-41

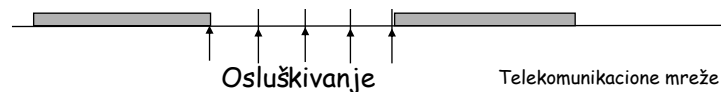
41

## Ethernet

### MAC kontrola

#### Carrier Sensing Multiple Access (CSMA)

- Ponašanje predajnika kada otkrije zauzeti kanal
  - 1-persistent CSMA (najpohlepniji)
    - Počinje slanje čim se kanal oslobodi
    - Nisko kašnjenje i niska efikasnost
  - Non-persistent CSMA (najmanje pohlepan)
    - Čeka period backoff-a, tada ponovo osluškuje medijum
    - Visoko kašnjenje i visoka efikasnost
  - p-persistent CSMA (podesiva pohlepnost)
    - Čeka dok se kanal ne oslobodi, šalje sa vjerovatnoćom  $p$ ; ili čeka u trajanju jednog mini slota i ponovo osluškuje sa vjerovatnoćom  $1-p$
    - Kašnjenje i efikasnost je moguće podešavati



Telekomunikacione mreže 4-42

42

## Ethernet

### MAC kontrola

#### CSMA-CD (CSMA with Collision Detection)

- Nadzire kolizije i prekida prenos
  - Stanice koje žele da šalju, prvo osluškuju prisustvo nocioca
  - Poslije početka slanja, stanice nastavljaju sa slušanjem kako bi detektovale koliziju
  - Ako je kolizija detektovana, sve stanice prekidaju prenos, određuju slučajna backoff vremena, i pokušavaju ponovo
- U CSMA kolizije rezultiraju u gubljenju  $X$  (L/R) sekundi za prenos cijelog frejma
- CSMA-CD smanjuje gubitak vremena na vrijeme do detekcije kolizije i prekida prenosa

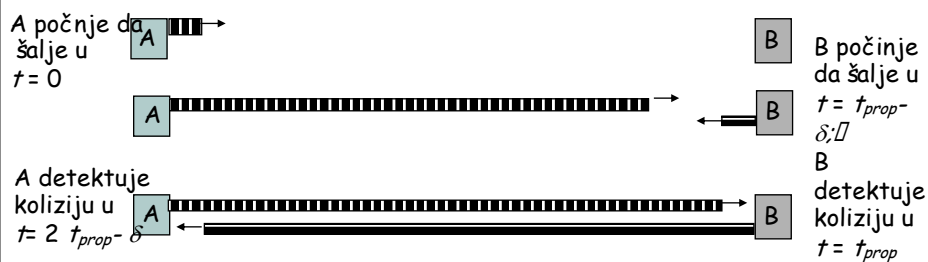
Telekomunikacione mreže 4-43

43

## Ethernet

### MAC kontrola

#### CSMA-CD (CSMA with Collision Detection)



Potrebno je vrijeme  $2 t_{prop}$  da bi se utvrdilo zauzimanje kanala

Telekomunikacione mreže 4-44

44

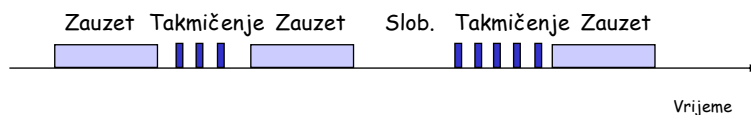
## Ethernet

### MAC kontrola

#### CSMA-CD (CSMA with Collision Detection)

##### □ Pretpostavke

- Kolizije se detektuju i rješavaju tokom  $2t_{prop}$
- Vrijeme je podijeljeno na  $2t_{prop}$  slotova tokom perioda takmičenja
- Neka je  $n$  zauzetih stanica, i neka svaka može slati sa vjerovatnoćom  $p$  u svakom periodu takmičenja
- Jednom kada je takmičenje završeno (stanica uspješno zauzima kanal), stanici treba  $X$  (L/R) sekundi za prenos frejma
- Potrebno je  $t_{prop}$  prije nego što počne naredno takmičenje.



Telekomunikacione mreže 4-45

45

## Ethernet

### MAC kontrola

#### CSMA-CD (CSMA with Collision Detection)

- Koliko traje takmičenje?
- Takmičenje završava kada tačno jedna stanica šalje tokom slota:

$$P_{uspjeh} = np(1-p)^{n-1}$$

- Nalaženjem prvog izvoda od  $P_{uspjeh}$  utvrđuje se da se njegova maksimum dobija za  $p=1/n$

$$P_{uspjeh}^{max} = n \frac{1}{n} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{n-1} = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{n-1} \rightarrow \frac{1}{e}$$

- Prosječno,  $1/P^{max} = e = 2.718$  vremenskih slotova je potrebno do okončanja takmičenja

$$\text{Srednje trajanje takmičenja} = 2t_{prop} e \text{ sekundi}$$

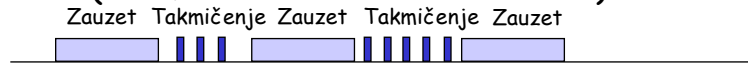
Telekomunikacione mreže 4-46

46

## Ethernet

### MAC kontrola

#### CSMA-CD (CSMA with Collision Detection)



- Pri maksimalnoj propusnosti, sistem nema slobodnih intervala

$$\rho_{\max} = \frac{X}{X + t_{\text{prop}} + 2et_{\text{prop}}} = \frac{1}{1 + (2e + 1)a} = \frac{1}{1 + (2e + 1)Rd / v L}$$

- Gdje je:
  - $R$  b/s,  $L$  b/frejmu,  $X = L/R$  s/frejmu
  - $a = t_{\text{prop}}/X$
  - $v$  m/s - brzina svjetlosti
  - $d$  rastojanje između dva krajnja sistema (m)
  - $2e + 1 = 6.44$

Telekomunikacione mreže 4-47

47

## Ethernet

### MAC kontrola

#### CSMA-CD (CSMA with Collision Detection)

- Sve do 10Gb/s Ethernet standardi su koristili CSMA-CD
- Npr za 10Mb/s Ethernet
  - 1-persistentna detekcija nosioca
  - $R = 10 \text{ Mb/s}$
  - $t_{\text{prop}} = 51.2 \mu\text{s}$ 
    - Slot je trajanje 512 bita = 64B (najmanji Ethernet frejm)
    - Podržavao je segment dužine 2.5 km sa 4 ripitera
  - Binarno eksponencijalni Backoff
    - Poslije  $n$  kolizija, bira backoff iz  $\{0, 1, \dots, 2^k - 1\}$ , gdje je  $k = \min(n, 10)$

Telekomunikacione mreže 4-48

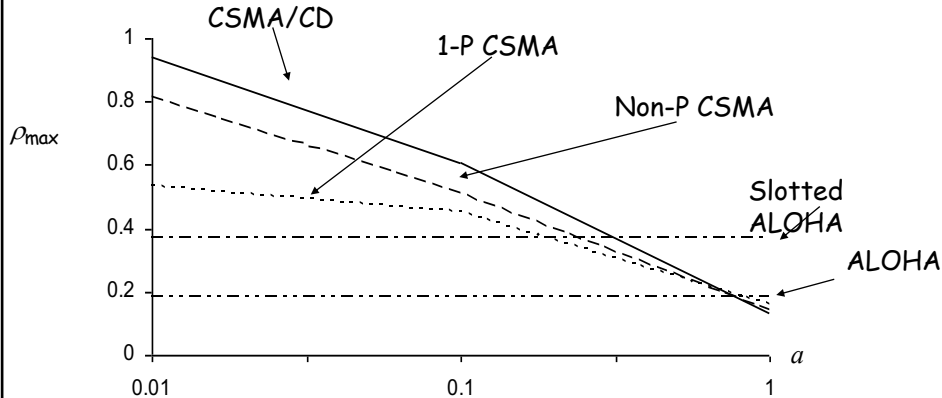
48



## Ethernet

### MAC kontrola

#### CSMA-CD (CSMA with Collision Detection)



- Za malo  $a$ : CSMA-CD ima najbolju propusnost
- Za veliko  $a$ : Aloha & slotted Aloha imaju bolju propusnost

Telekomunikacione mreže 4-49

49

## Ethernet

### MAC kontrola

#### CSMA-CD (CSMA with Collision Detection)

- Neke aplikacije zahtijevaju brži odziv od drugih, npr. ACK poruke
- Potreba za različitim vremenima između frejmova
  - Visoko prioritetni saobraćaj prati kanal tokom vremena  $\tau_1$
  - Nisko prioritetni saobraćaj osluškuje kanal tokom vremena  $\tau_2 > \tau_1$
  - Ako je prisutan visoko prioritetni saobraćaj, zauzima prvi kanal
- Ovaj mehanizam se koristi u IEEE 802.11 WLAN

Telekomunikacione mreže 4-50

50

## Ethernet

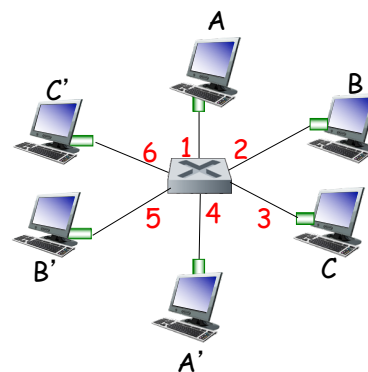
### Switch

- Uređaj nivoa linka
  - Smješta i prosleđuje Ethernet frejmove
  - Ispituje zaglavlje frejma i selektivno prosleđuje frejm na bazi MAC destinacione adrese
  - Kada se frejm prosleđuje na segment, koristi se CSMA/CD za pristup segmentu
- Transparento
  - Hostovi ne osjećaju prisustvo switch-eva
- Plug-and-play, samouki
  - Switch-evi ne moraju da se konfiguriraju

## Ethernet

### Switch

- 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



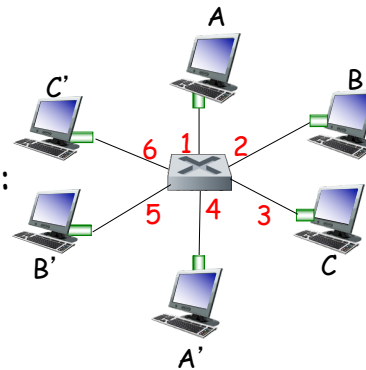
Komutator sa 6 interfejsa  
(1,2,3,4,5,6)

## Ethernet Switch

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!



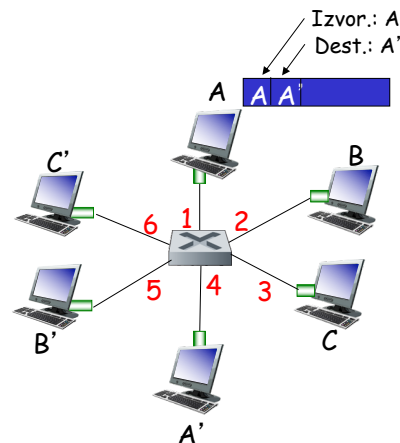
switch sa 6 interfejsa (1,2,3,4,5,6)

53

## Ethernet Switch

□ switch *uči* koji hostovi se mogu doseći preko kojih interfejsa

- Kada frejm stigne, switch "naučiti" lokaciju pošiljaoca
- Upisuje par pošiljalac/lokacija u tabelu



MAC adr.	interface	TTL
A	1	60

Tabela prosleđivanja (prazna na početku)

54

# Ethernet

## Switch

Kada switch primi frejm:

Indeksira tabelu komutiranja koristeći MAC  
destinacionu adresu

**if** je sadržaj pronađen za destinaciju

**then**{

**if** destinacija na segment sa kojeg je došao frejm

**then** odbaci frejm

**else** proslijedi frejm na odgovarajući interfejs

}

**else** šalji na sve segmente, sem na onaj odakle je  
frejm stigao

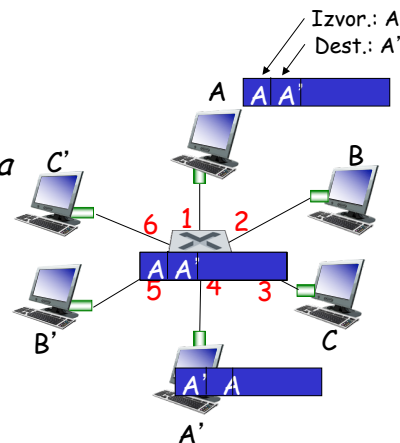
# Ethernet

## Switch

□ Destinacija frejma,  
A', nepoznata: *Šalji svima*

□ Destinacija frejma  
A je poznata

Selektivno šalji na jedan link

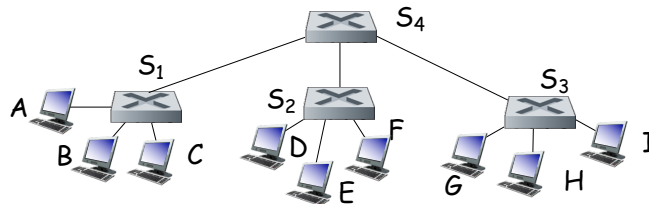


MAC adr.	interfejs	TTL
A	1	60
A'	4	60

Tabela  
proseđivanja

## Ethernet Switch

Switchevi se mogu povezivati



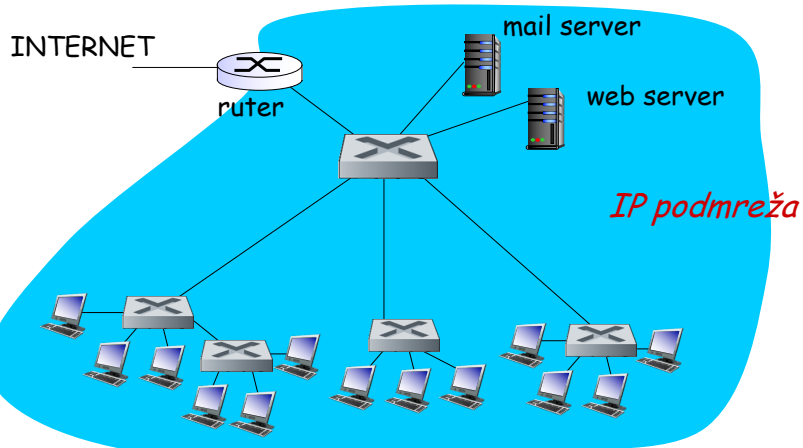
Ako se frejm šalje od A do G - kako  $S_1$  zna da prosljedi frejm adresiran za G preko  $S_4$  i  $S_3$ ?

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

Telekomunikacione mreže 4-57

57

## Ethernet Switch



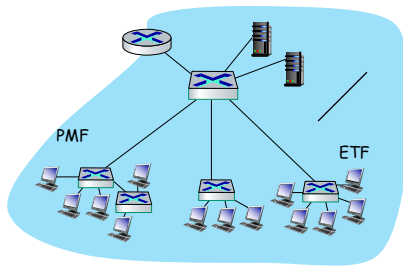
Telekomunikacione mreže 4-58

58

## Ethernet

### Virtuelni LAN (VLAN)

Šta se dešava kada LAN mreža poraste?



#### Jedan broadcast domen:

- Čitav broadcast saobraćaj nivoa linka (ARP, DHCP, nepoznate MAC adrese,...) se penosi preko čitavog LAN-a
- Problemi efikasnosti, sigurnosti, privatnosti,...

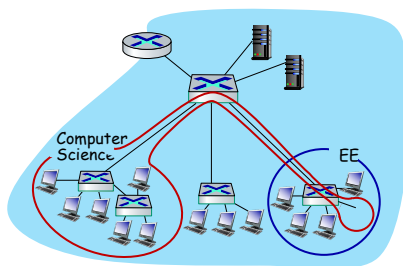
Telekomunikacione mreže 4-59

59

## Ethernet

### Virtuelni LAN (VLAN)

Šta se dešava kada LAN mreža poraste?



#### Jedan broadcast domen:

- Čitav broadcast saobraćaj nivoa linka (ARP, DHCP, nepoznate MAC adrese,...) se penosi preko čitavog LAN-a
- Problemi efikasnosti, sigurnosti, privatnosti,...

#### Administrativni izazovi:

- Korisnik sa PMF-a se preseli na ETF i fizički se povezuje na ETF-ov switch ali želi da ostane logički povezan na PMF-ovu mrežu

Telekomunikacione mreže 4-60

60

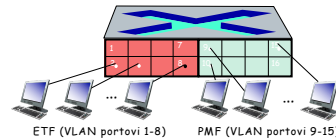
## Ethernet Virtuelni LAN (VLAN)

### Virtual Local Area Network (VLAN)

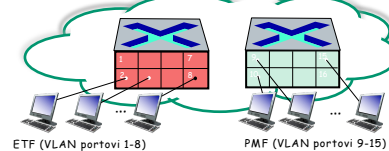
Switch koji podržava VLAN se može konfigurirati tako da definiše više VLAN-ova na istoj fizičkoj infrastrukturi.

VLAN se može kreirati i dodjelom MAC adresa!

Kod VLAN-a kreiranog dodjelom portova portovi switch-a su, prilikom njegove konfiguracije, grupisani kao da su portovi jednog fizičkog switch-a



Jedan switch funkcioniše kao više virtuelnih

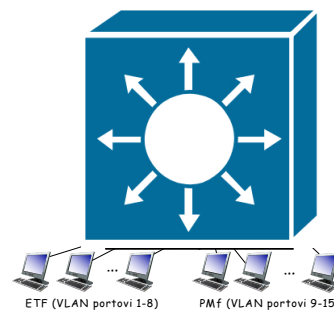


Telekomunikacione mreže 4-61

61

## Ethernet Virtuelni LAN (VLAN)

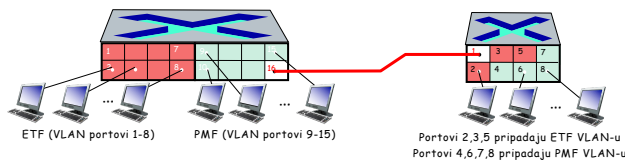
- ❑ **Izolacija saobraćaja:** frejmovi od/do portova 1-8 samo mogu doseći portove 1-8
- ❑ **Dinamička pripadnost:** portovi se dinamički mogu dodjeljivati različitim VLAN-ovima
- ❑ **Prosleđivanje između VLAN-ova:** obavlja se rutiranjem
  - ❑ U praksi se realizuje kombinovani uređaj "switch-ruter" koji je poznat kao L3 switch



Telekomunikacione mreže 4-62

62

## Ethernet Virtuelni LAN (VLAN)



**trunk port:** prenosi frejmove VLAN-ova koji su definisani na različitim switch-evima

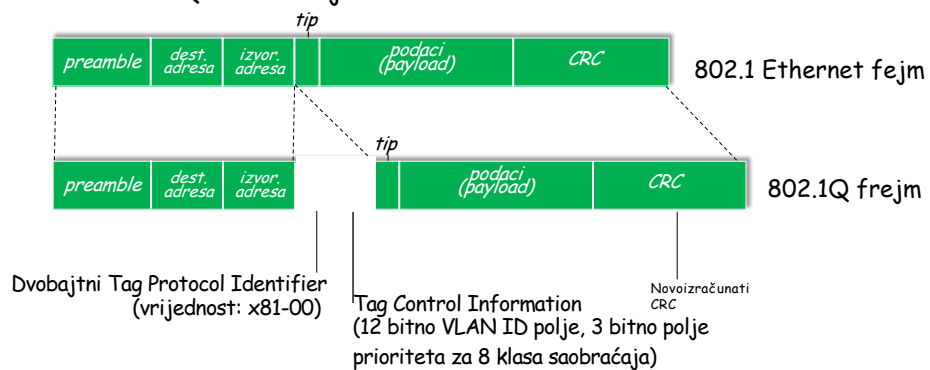
- ❑ Frejmovi koji se prosleđuju unutar ovakvih VLAN-ova ne mogu biti obični 802.1 frejmovi
- ❑ IEEE 802.1q protocol uvodi VLAN tag polje u strukturu Ethernet frejma
- ❑ VLAN tag se dodaje/uklanja prilikom ulaska/izlaska na trunk port

Telekomunikacione mreže 4-63

63

## Ethernet Virtuelni LAN (VLAN)

Format 802.1Q VLAN frejma



Telekomunikacione mreže 4-64

64