



Faculty of Electrical Engineering  
Department of Automatic Control  
and Electronics, Sarajevo

## Data Acquisition and Transmission Akvizicija i prijenos podataka



### 7. Data Link Layer - MAC protocols Network Interconnection and Virtualization

Podatkovni sloj - MAC protokoli  
Povezivanje i virtualizacija mreža

Doc.dr.sc. Jasmin Velagić, Ph.D.

2007/2008

# Sadržaj poglavlja:

## ✚ Protokoli podsloja pristupa mediju

- Statičko dijeljenje kanala
  - TDMA (Time Division Multiple Access)
  - FDMA (Frequency Division Multiple Access)
  - CDMA (Code Division Multiple Access)
- Slučajni pristup (protokoli sa sukobima)
  - ALOHA sa vremenskim okvirima
  - Čista ALOHA
  - CSMA/CD
- Dinamičko dijeljenje kanala (protokoli sa ograničenim sukobima)
  - Polling
  - Predavanje zaloga (Token passing)

## ✚ Povezivanje mreža

- MAC adresiranje
- Ethernet
- PPP
- ATM
- MPLS

## 7. Protokoli podsloja pristupa mediju

### Veze i protokoli višestrukog pristupa

#### Tri vrste veza:

- Tačka-tačka (point-to-point)(žičane, na primjer PPP, SLIP).
- Broadcast (dijele žice ili medij, na primjer Ethernet, Wavelan, sateliti, itd.).
- Prospojne (switched, npr. switched Ethernet, ATM, itd.).

#### Svojstva:

- Dijeljenje pojedinačnog komunikacijskog kanala – omogućiti da više stanica dijeli isti kanal.
- Dva ili više istovremena prijenosa sa čvorovima:  
interferencija (smetnja)
  - samo jedan čvor može uspješno slati u jednom trenutku.

# MAC protokoli

## Protokoli višestrukog pristupa

- Distribuirani algoritam koji određuje kako stanice dijele kanal, to jest određuje kada stanica može izvršiti prijenos.
- Komunikacija oko dijeljenja kanala mora koristiti vlastiti kanal.
- Dodjeljivanje (dijeljenje) kanala:
  - Statičko,
  - Dinamičko.
- Šta se traži od MAC protokola:
  - sinhronizacija ili nesinhronizacija,
  - potrebne informacije o drugim stanicama,
  - robusnost (npr. greške kanala),
  - performanse.

# MAC protokoli

## Taksonomija MAC protokola

Tri opće klase:

### ❑ Statičko dijeljenje kanala

- ◆ Dijeljenje kanala u manje dijelova (vremenski slotovi, frekvencija).
- ◆ Dodjeljivanje dijelova čvoru za ekskluzivnu upotrebu.

### ❑ Slučajni pristup

- ◆ Dopušta koliziju.
- ◆ Rekonstrukcija iz sukoba.

### ❑ Dinamičko dijeljenje kanala (Taking turns)

- ◆ Pristup čvrsto koordiniranog dijeljenja sa ciljem izbjegavanja sukoba.

Cilj: efikasnost, ispravnost, jednostavnost, decentraliziranost.

## 7.1. MAC protokoli dijeljenja kanala

### TDMA (Time Division Multiple Access)

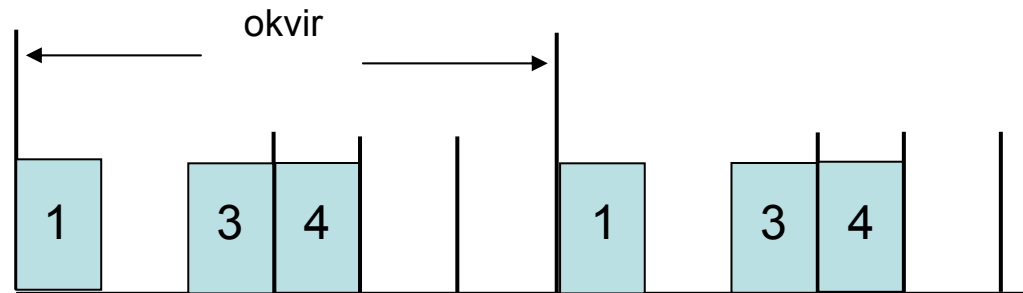
Karakteristike:

- Omogućuju stanicama korištenje iste frekvencije (nosioca), dijeljenjem u različite vremenske slotove.
- Pristup kanalu u “rundama”.
- Svaka stanica dobiva fiksnu duljinu slota u svakoj rundi.
- Nekorišteni slotovi postaju prazni.
- Stanice šalju podatke jedna iza druge, koristeći vlastite vremenske slotove.
- Ovo omogućuje većem broju stanica da dijele isti prijenosni medij (npr. radio – bežične komunikacije) koristeći samo dio propusnog opsega.
- Osim wirelessa, TDMA se koristi i u satelitskim sistemima, lokalnim mrežama, sistemima zaštite i combat-net radio sistemima.
- U Americi se TDMA koristi u drugoj generaciji mobilnih telefona ([2G](#)), također poznatoj i kao [IS-136](#) ili [D-AMPS](#), koji koriste TDMA tehniku za vremensko dijeljenje propusnog opsega signala nosioca.

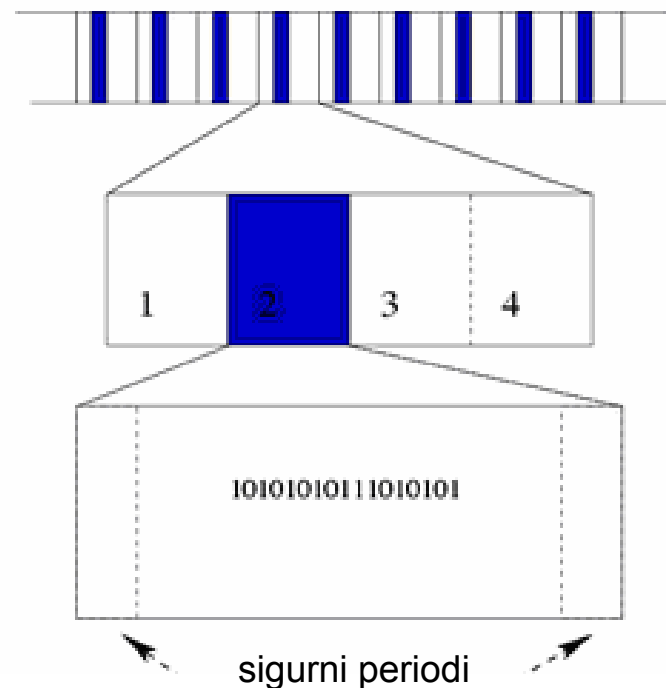
# MAC protokoli dijeljenja kanala

## TDMA (Time Division Multiple Access)

- Primjer: 6-stanični LAN, slotovi 2, 5 i 6 su prazni.



- Primjer: Prikaz podjele poruke u okvire i okvir u vremenske slotove



Niz podataka se dijeli u okvire.

Okviri se dijele u vremenske slotove. Svakoj stanici se dodjeljuje jedan slot.

Vremenski slotovi sadrže podatke sa "sigurnim" periodom ako je potrebna sinhronizacija.

# MAC protokoli dijeljenja kanala

## TDMA (Time Division Multiple Access)

- ❑ U GSM sistemima, sinhronizacija između mobilnih telefona postiže se slanjem “timing offset” komandi od strane bazne stanice koja instruiira da li će mobilni telefon početi sa prijenosom ranije ili kasnije.
- ❑ Mobilnom telefonu nije dopušteno da šalje signale u toku cijelog vremenskog slota, ali postoji “sigurni” period na početku i na kraju slota.
- ❑ Kada se prijenos pomiče u “sigurni” period, mobilna mreža podešava vremenski offset na centar prijenosa.
- ❑ Veći problem je inicijalna sinhronizacija mobilnih telefona. Prije nego li mobilni telefon započne prijenos, ne postoji način da se tačno zna koliki se vremenski offset zahtijeva.
- ❑ Zbog ovoga mobilni telefon može potrošiti gotovo cijeli vremenski slot kontaktirajući mrežu. Ako je mobilni telefon blizu bazne stanice, on će na početku svog slota dobiti zahtijevanu informaciju od mreže, nema kašnjenja i sve je OK.
- ❑ Međutim, ako je na udaljenosti većoj od 35 km postoji kašnjenje i mobilni telefon će dobiti informaciju od mreže blizu kraja svog slota.

**Rješenje: započeti jedan slot ranije od očekivanog.**



## MAC protokoli dijeljenja kanala

### TDMA (Time Division Multiple Access)

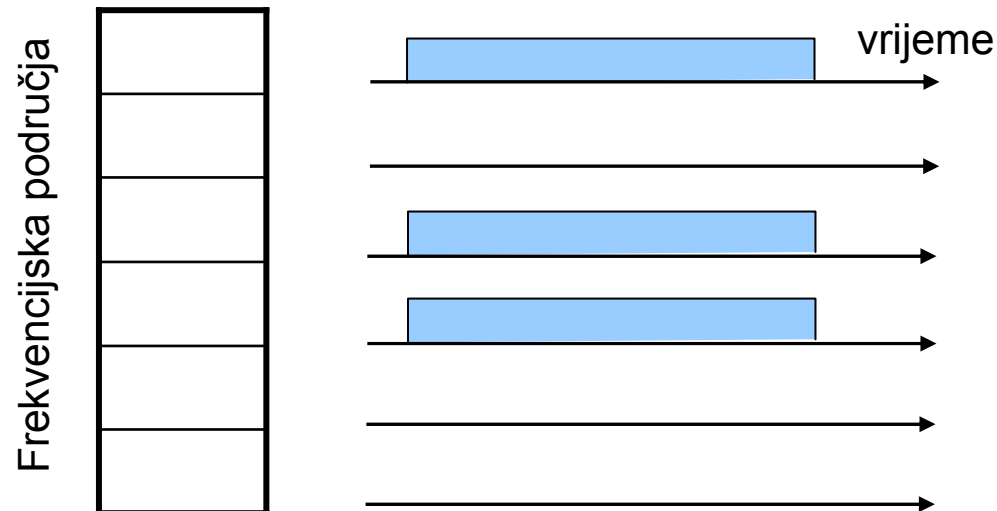
- ❑ Nedostatak TDMA sistema je što mogu stvarati smetnje na frekvenciji koja je direktno povezana sa duljinama vremenskih slotova.
- ❑ Ovo izaziva iritirajuće brujanje (buzz) kada se npr. mobilni telefon nađe blizu radio prijemnika.
- ❑ Drugi nedostatak TDMA je postojanje mrtve zone između vremenskih slotova, što limitira potencijalni propusni opseg TDMA kanala.

# MAC protokoli dijeljenja kanala

## FDMA (Frequency Division Multiple Access)

Karakteristike:

- ❑ Spektar kanala dijeli se u frekvencijska područja.
- ❑ Svakoj stanici dodjeljuje se fiksano frekvencijsko područje.  
(korisnici imaju različite frekvencije – nema ometanja).
- ❑ Nekorišteni vremenski prijenosi u frekvencijskom području postaju prazni.
- ❑ Primjer: 6-stanični LAN, slotovi 2, 5 i 6 su prazni.



# MAC protokoli dijeljenja kanala

## FDMA (Frequency Division Multiple Access)

- ❑ Koristi se u mobilnoj telefoniji. Svaki frekvencijski kanal može prenositi glas (konverzacija) ili digitalni podatak, i jedan kanal će biti pridružen svakom pretplatniku koliko traje poziv. Korištenjem FDMA na ovaj način, više korisnika može dijeliti dostupno područje bez rizika ometanja između istovremenih poziva.
- ❑ Nije efikasno ako je velik broj stanica i ako se njihov broj mijenja.
- ❑ Razlozi za to su:
  - mnogo stanica, mnogo frekvencija, razmak između frekvencija se smanjuje – povećava se vjerojatnost da jedna stanica ometa drugu,
  - ako se neke od stanica ne koriste tada njihove frekvencije nisu dostupne drugima,
  - promet podacima ima tendenciju smanjivanja, to jest veliki dio kanala bit će prazan većinu vremena.
  - puni kapacitet kanala se neće u cijelosti iskoristiti.

# MAC protokoli dijeljenja kanala

## CDMA (Code Division Multiple Access)

Karakteristike:

- ❑ Jedinствен kod dodjeljuje se svakoj stanici, to jest dijeljenje skupa kodova.
- ❑ Najviše korišten u bežičnim (wireless) broadcast kanalima (celularni, satelitski, itd.).
- ❑ Svi korisnici dijele istu frekvenciju, ali svaki korisnik ima vlastitu “chipping” sekvencu (to jest kod) za kodiranje podataka.
- ❑ **Kodirani signal** = (originalni signal)  $\times$  (chipping sekvencu).
- ❑ **Dekodiranje**: skalarni produkt kodiranog signala i chipping sekvence.
- ❑ Dopušta većem broju korisnika da koegzistiraju i istovremeno prenose podatke sa minimalnim uzajamnim ometanjem (ako su kodovi ortogonalni).

# MAC protokoli dijeljenja kanala

## CDMA (Code Division Multiple Access)

### Matematička interpretacija

- ❑ Koristi matematička svojstva ortogonalnosti.
- ❑ Podaci se predstavljaju vektorima. Npr. binarni niz "1011" predstavlja se vektorom (1, 0, 1, 1).
- ❑ Koristi se matematička operacija skalarnog produkta, tj. sumiranje umnoška komponenti. Npr. skalarni produkt (1, 0, 1, 1) i (1, -1, -1, 0) je  $(1)(1)+(0)(-1)+(1)(-1)+(1)(0)=0$ .
- ❑ Ako je skalarni produkt vektora **a** i **b** jednak 0, tada se kaže da su ta dva vektora ortogonalna.
- ❑ Pretpostavimo da imamo skup uzajamno ortogonalnih vektora. Za potrebe dekodiranja ovi vektori su formirani iz stupaca i redaka Walsh-ove matrice, koja je dobivena iz Walsh-ovih funkcija.
- ❑ Sada se pridruži jednom predajniku vektor iz ovog skupa, recimo **v**, koji se zove "chip" kod. Bitu 0 pridruži se vektor  $-v$  i bitu 1 vektor **v**. Npr. ako je  $v=(1,-1)$ , tada će binarnom vektoru (1, 0, 1, 1) odgovarati vektor (1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1). Ovako formirani vektor zove se odaslani vektor.
- ❑ Svaki predajnik ima različit, jedinstven vektor izabran iz ovog skupa, ali je konstrukcija odaslanoog vektora identična.

# MAC protokoli dijeljenja kanala

## CDMA (Code Division Multiple Access)

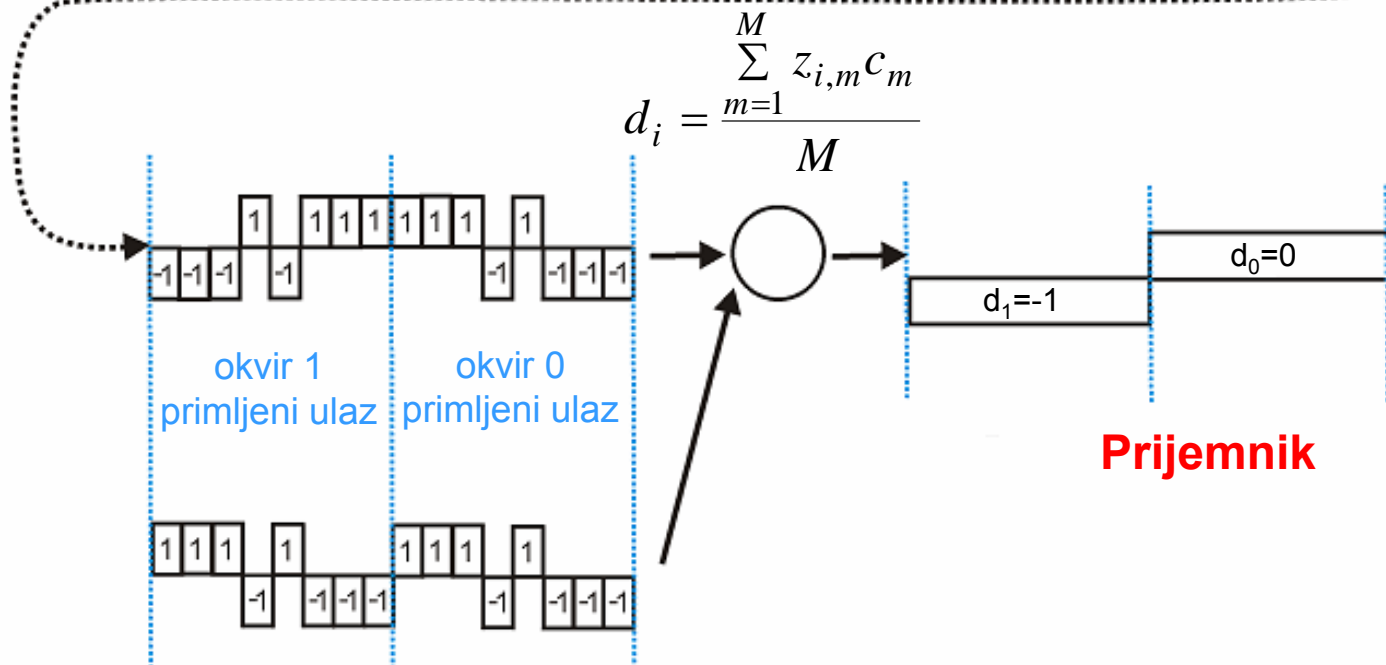
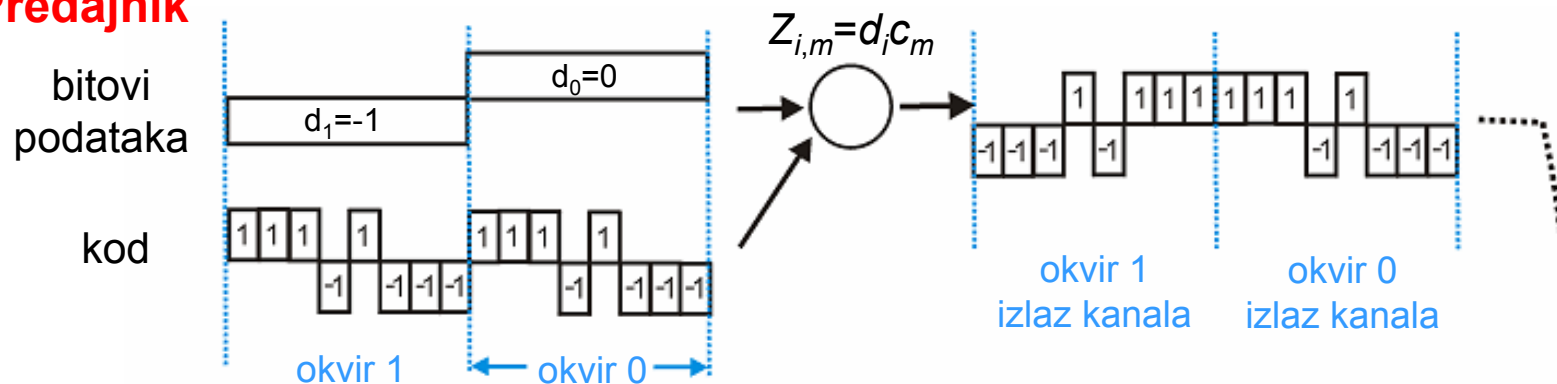
### Matematička interpretacija

- ❑ Ako imamo dva predajnika, koja istovremeno šalju podatke, jedan sa chip kodom  $(1, -1)$  i vektorom podataka  $(1, 0, 1, 1)$ , i drugi sa chip kodom  $(1, 1)$  i vektorom podataka  $(0, 0, 1, 1)$ .
- ❑ “Sirovi” primljeni signal bit će suma odaslanih vektora:  
 $(1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1) + (-1, -1, -1, -1, 1, 1, 1, 1) = (0, -2, -2, 0, 2, 0, 2, 0)$ .
- ❑ Pretpostavimo da prijemnik uzme takav signal i želi detektirati šta je predajnik sa chip kodom  $(1, -1)$  poslao. Prijemnik će koristiti ranije opisanu matematiku i načiniti skalarni produkt dijelova primljenog vektora.
- ❑ Uzeti prve dvije komponente primljenog vektora, tj.  $(0, -2)$ . Sada,  $(0, -2) \cdot (1, -1) = (0)(1) + (-2)(-1) = 2$ . Budući da je rezultat pozitivan, možemo zaključiti da je odaslana znamenka 1. Zatim, uzmemo slijedeće dvije komponente  $(-2, 0)$ ,  $(-2, 0) \cdot (1, -1) = (-2)(1) + (0)(-1) = -2$ . Rezultat je negativan, što znači da je poslana 0. Nastavljajući ovaj proces može se uspješno dekodirati šta je poslano sa chip kodom  $(1, -1)$ , tj.  $(1, 0, 1, 1)$ .

# MAC protokoli dijeljenja kanala

## CDMA kodiranje i dekodiranje (jedan predajnik)

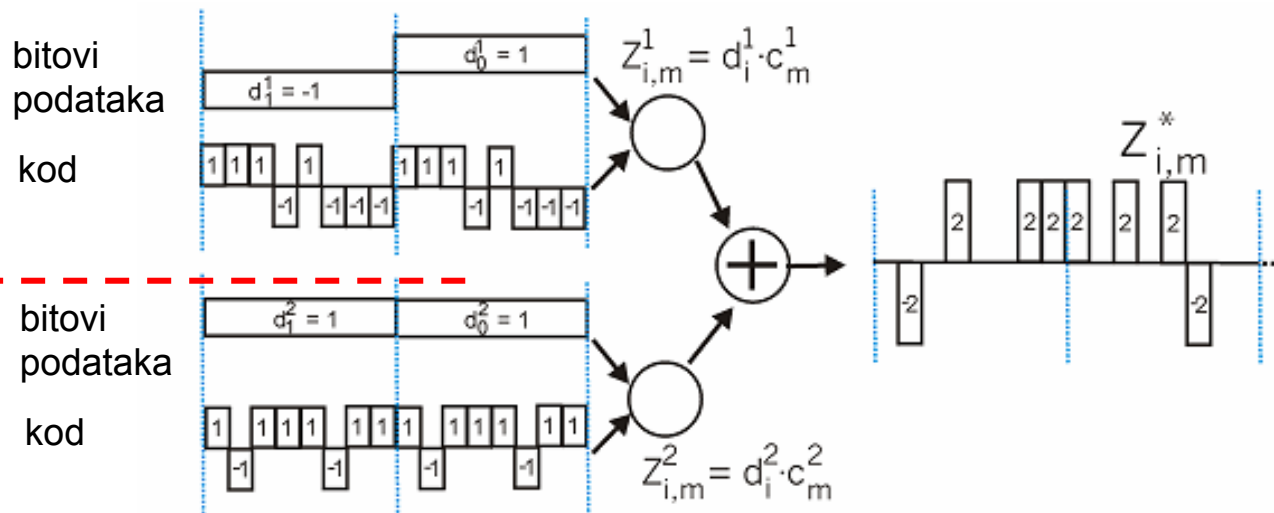
### Predajnik



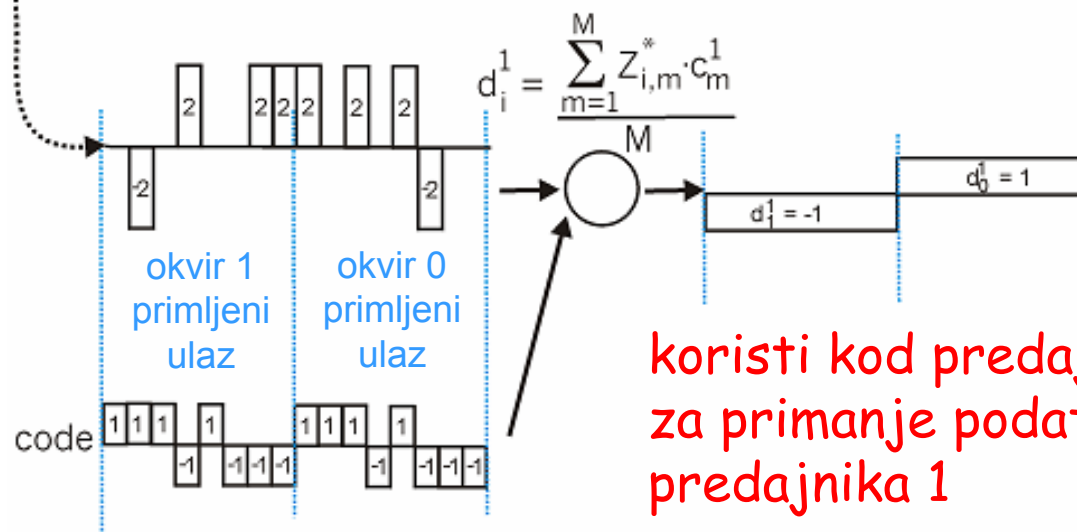
# MAC protokoli dijeljenja kanala

## CDMA interferencija dva predajnika

Predajnik 1



Predajnik 2



koristi kod predajnika 1 za primanje podataka predajnika 1



# MAC protokoli dijeljenja kanala

## CDMA (Code Division Multiple Access)

### Primjena u mobilnoj telefoniji:

- ❑ GPS (Global Positioning System). Dio GPS prijemnika u ćeliji bazne stanice.
- ❑ 2G (QUALCOMM,IS-95) i 3G (IMT-2000) standardi. To su standardi za tzv. “digital cellular telephony systems”.
- ❑ Radio sat temeljen na CDMA u računarskim mrežama. Glavna prednost korištenja ovakvih CDMA telefonskih ćelija signala za referentni sat je da oni rade bolje unutar zgrada (stambenih objekata), tako da nema potrebe za montiranjem GPS antene van zgrade.
- ❑ CDMA tehnika se koristi i kao princip W-CDMA zračnog sučelja i ovo sučelje se koristi u globalnom 3G standardu,UMTS, i japanskim 3G standardima FOMA and Vodafone.
- ❑ Glavna prednost CDMA u odnosu na TDMA i FDMA je “beskonačan” broj raspoloživih CDMA kodova. Ovo čini CDMA idealnom za veliki broj predajnika, gdje svaki koristi mali dio prometa na “neregularnim” intervalima.

## 7.2. MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

Karakteristike:

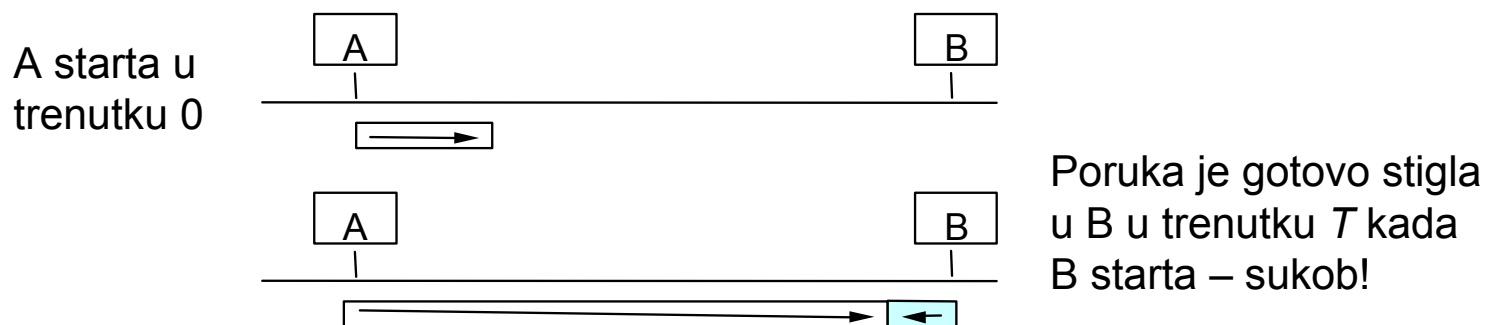
- ❑ Kada čvor ima paket za slanje
  - prenositi podatke maksimalnom brzinom u kanalu  $R$ ,
  - nema *a-priori* koordinacije između čvorova.
- ❑ Dva ili više prijenosnih čvorova → “sukob”.
- ❑ **MAC protokol sa slučajnim pristupom (sukobom)** specificira:
  - kako detektirati sukob,
  - kako oporaviti (vratiti natrag) okvire iz sukoba.
- ❑ Primjeri MAC protokola sa slučajnim pristupom:
  - ALOHA sa vremenskim okvirima (slotted ALOHA),
  - čista ALOHA,
  - CSMA i CSMA/CD.

# MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

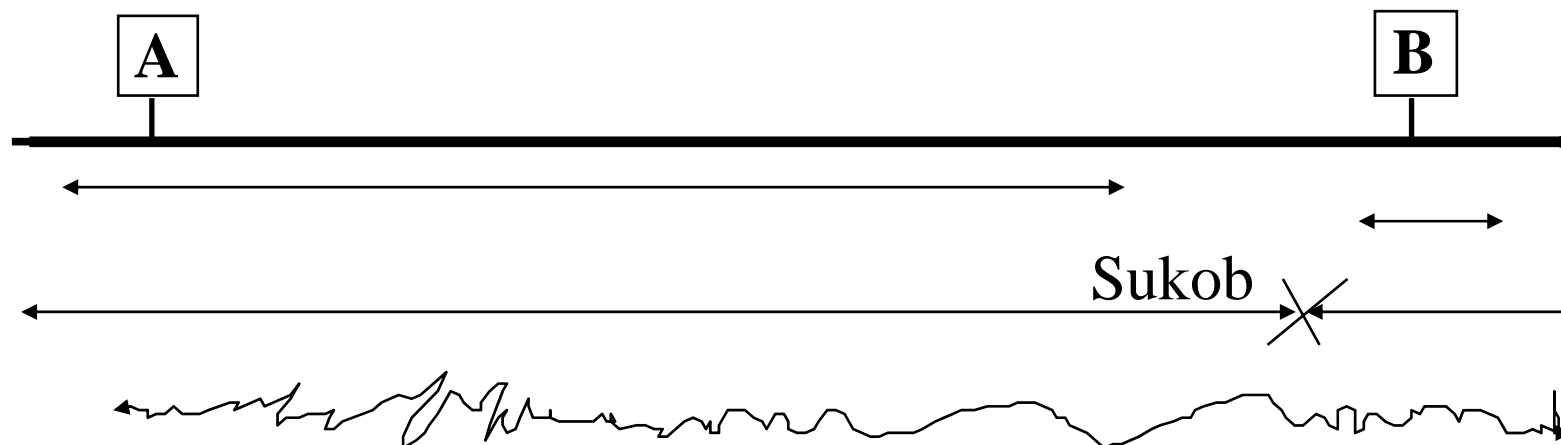
## Problem sukoba (kolizije)

Sukobi se događaju kada dva predajnika šalju u isto vrijeme (oni osjete sukob na temelju razlike napona).

- Obje nađene linije treba isprazniti.
- Obje čekaju zauzetu liniju da postane prazna.



Kako biti siguran da A zna da je došlo do sukoba?



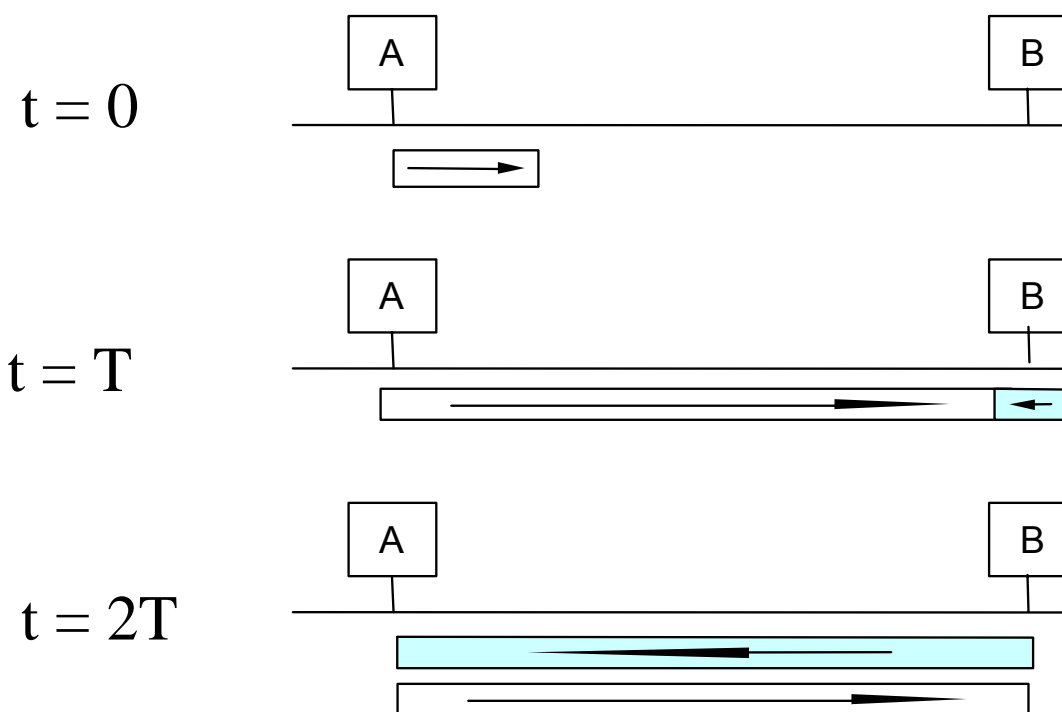
# MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

## Problem sukoba (kolizije)

- Kako A zna da se desio sukob?
  - Mora postojati mehanizam koji će osigurati retransmisiju u trenutku sukoba.
  - Poruka od A dolazi u B u trenutku  $T$ .
  - Poruka od B dolazi u A u trenutku  $2T$ .
  - A mora još poslati poruku u trenutku  $2T$ .
- IEEE 802.3 specificira maksimalnu vrijednost od  $2T$ , koja iznosi  $51.2\mu s$ .
  - Ovo je povezano sa maksimalnim razmakom između stanica od 2500 metara.
  - Na brzini 10Mbps uzima  $0.1\mu s$  za prijenos jednog bita, tako da za 512 bita (64B) treba  $51.2\mu s$ .
  - Slijedi da Ethernet okviri moraju biti najmanje dugi 64B.
    - 14B zaglavlje, 46B podaci, 4B CRC
    - Punjenje (padding) se koristi ako je poruka kraća od 46B.
- Slati ometajući signal nakon detekcije sukoba da bi se osiguralo da sve stanice vide sukob - 48 bitni signal.

# MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

## Problem sukoba (kolizije)



- Kod LAN mreža sukob se trenutno detektira.
- U satelitskim mrežama postoji kašnjenje od 270 *ms*.

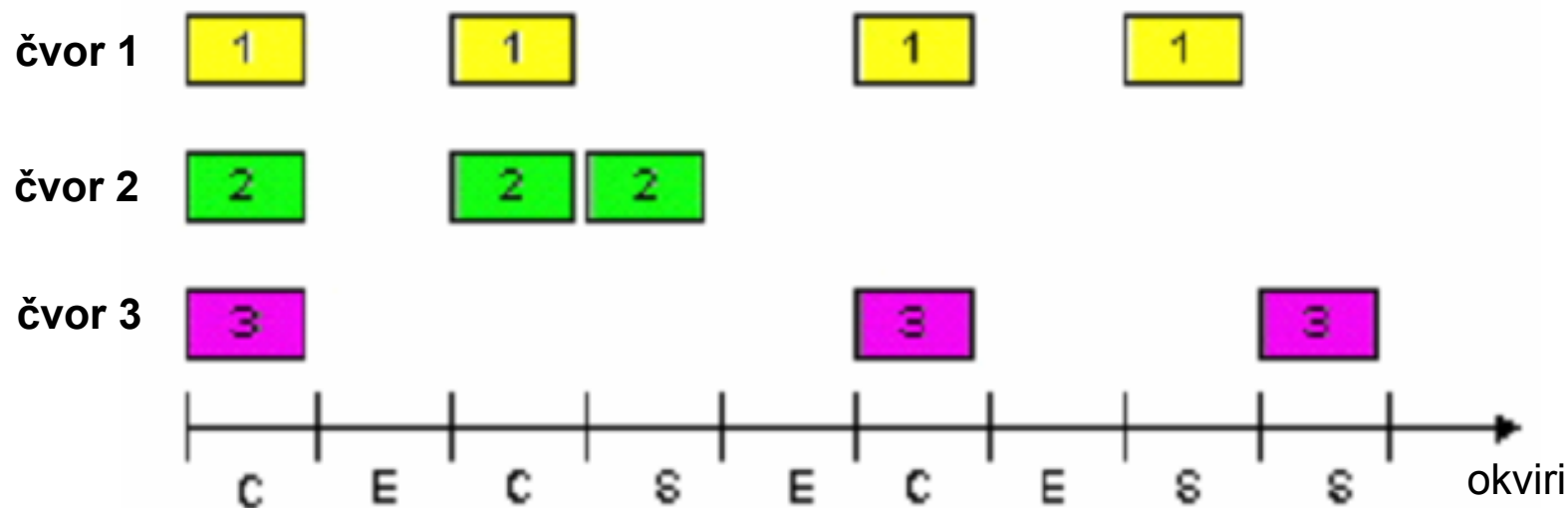
# MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

## ALOHA sa vremenskim okvirima

- Svi okviri imaju jednake duljine.
- Vrijeme je podijeljeno na slotove jednake duljine, duljina slota predstavlja vrijeme potrebno za slanje jednog okvira.
- Stanice (čvorovi) započinju prijenos okvira samo na početku slota.
- Čvorovi su sinhronizirani.
- Ako dva ili više čvorova šalju u jednom slotu, svi čvorovi će detektirati sukob.
- Kada čvor postigne “osvježen” okvir, poslat će ga u slijedećem slotu.
- Ako nema sukoba, čvor može poslati novi okvir u slijedećem slotu.
- Ako postoji sukob, čvor obavlja retransmisiju okvira u svakom slijedećem slotu sa vjerojatnošću  $p$ , dok se ne obavi uspješno prijenos okvira.

# MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

## ALOHA sa vremenskim okvirima



uspješni (S), sukobljeni (C), prazni (E) okviri

- Pojedinačni aktivni čvor može kontinuirano slati punom brzinom kanala.
- Visoka decentralizacija: samo slotovi u čvorovima imaju potrebu za sinhronizacijom.
- Jednostavna.
- U slučaju sukoba – gubitak okvira.
- Prazni slotovi.
- Čvorovi mogu detektirati sukob u vremenu kraćem od vremena potrebnog za prijenos okvira (paketa).
- Sinhronizacija sata.

# MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

## ALOHA sa vremenskim okvirima

Efikasnost ALOHA sa vremenskim okvirima:

**Pitanje:** Koja je maksimalna podjela slotova uspješna?

**Odgovor:** Pretpostavimo da imamo  $N$  stanica koje imaju pakete za slanje.

- vjerojatnost da stanica pošalje slot je  $p$ ,
- vjerojatnost uspješnog slanja  $S$  je:

$$S = p(1-p)^{(N-1)} \text{ za čvor 1,}$$

$$S = Np(1-p)^{(N-1)} \text{ za bilo koji od } N \text{ čvorova, ovo je vjerojatnost za jedan prijenos.}$$

Za maksimalnu efikasnost sa  $N$  čvorova naći  $p$  koji maksimizira  $Np(1-p)^{(N-1)}$ .

Drugim riječima potrebno je naći optimalni  $p$  za koji  $N \rightarrow \infty$ .

$$= 1/e = 0.37.$$

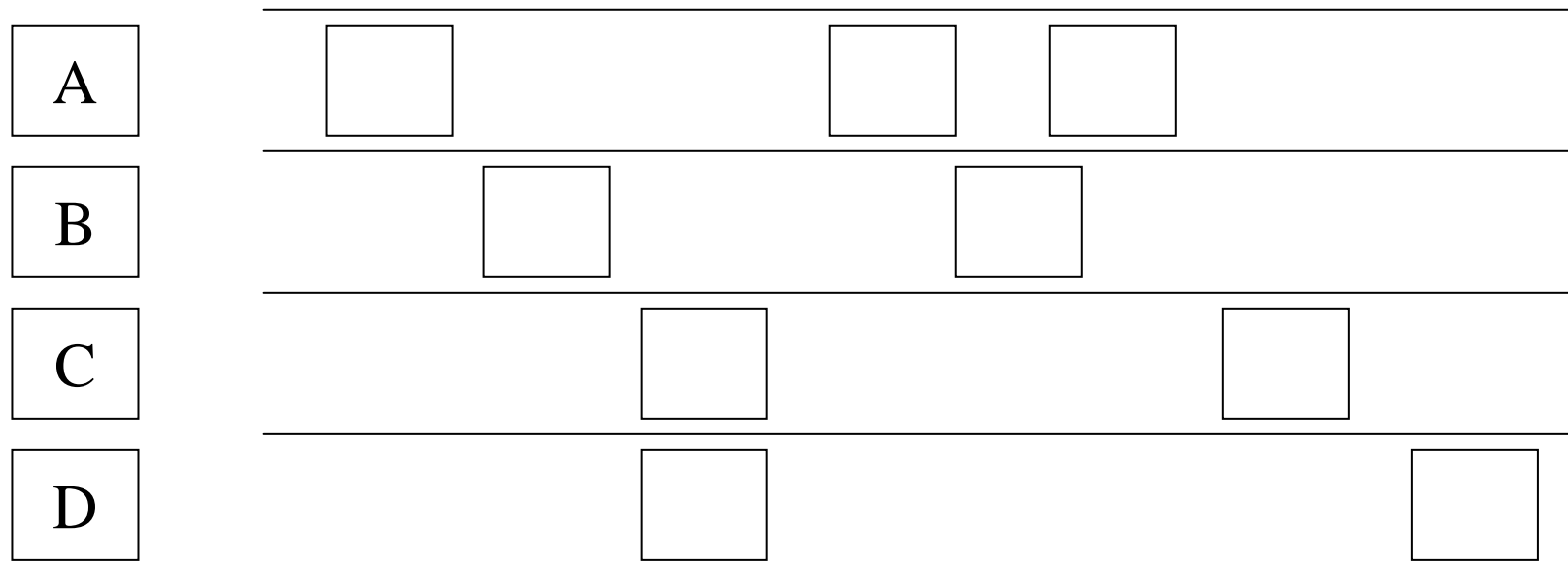
Najbolje – korištenje kanala za uspješne prijenose – 37% vremena.



# MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

## Čista ALOHA

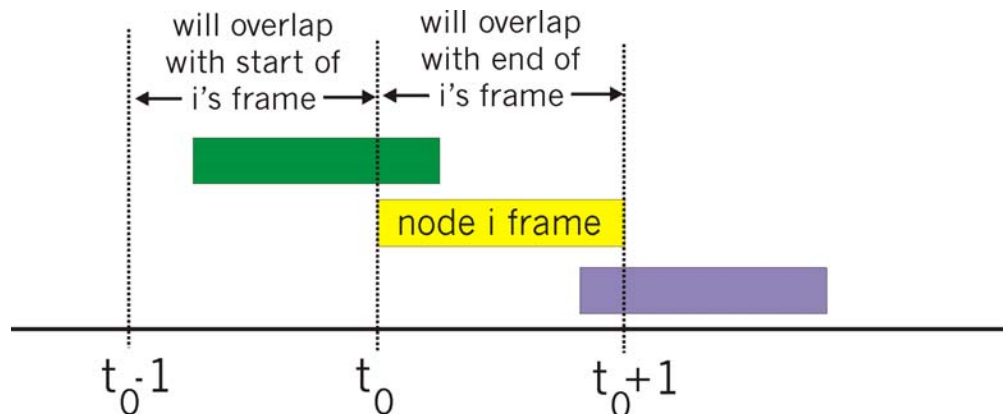
- ❑ Čista ALOHA: jednostavna, nema sinhronizacije.
- ❑ Svaka stanica šalje podatke kad god to želi – ne čeka se početak okvira.
- ❑ Okviri imaju jednake duljine.



# MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

## Čista ALOHA

- ❑ Kada dva okvira nastoje istovremeno “okupirati” kanal uzrokovat će sukob i oba će biti oštećena.
- ❑ Ako se prvi bit jednog okvira preklapa sa zadnjim bitom drugog okvira, oba će se oštetiti.
- ❑ Vjerojatnost sukoba raste.
  - Okvir poslan u trenutku  $t_0$  dolazi u sukob sa drugim okvirom poslanim u intervalu  $[t_0-1, t_0+1]$ .



Ako je zadnji bit oštećen, tada je on u **checksum** ili **CRC** i podatkovni dio okvira je OK. Ovo ignorira vjerojatnost dvije greške, jedne u podatkovnom dijelu okvira i druge u kontrolnom dijelu okvira, npr. CRC.

- ❑ Okviri poruka koji dođu u sukob bivaju uništeni.
- ❑ Predajnik zna da je okvir uništen, čeka slučajno vrijeme i ponovo pokušava poslati poruku (retransmisija).

# MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

## Čista ALOHA

$P(\text{uspjeh sa zadanim čvorom}) = P(\text{čvor prenosi}) \cdot$

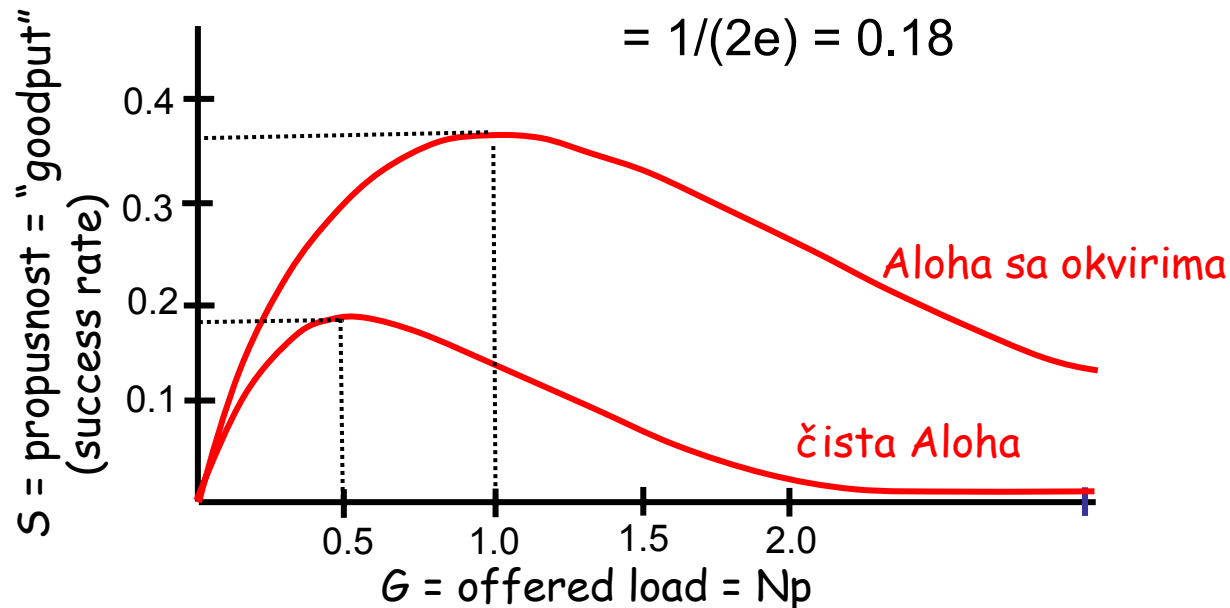
$P(\text{nema drugih čvorova da prenose u } [t_0-1, t_0]) \cdot$

$P(\text{nema drugih čvorova da prenose u } [t_0, t_0 + 1])$

$$= p \cdot (1-p)^{(N-1)} (1-p)^{(N-1)}$$

$P(\text{uspjeh sa bilo kojim od } N \text{ čvorova}) = N p \cdot (1-p)^{(N-1)} (1-p)^{(N-1)}$

... izbor optimalnog  $p$  da se postigne  $n \rightarrow \infty \dots$



*protokol* ograničava efektivnu propusnost kanala!

# MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

## CSMA (Carrier Sense Multiple Access)

- Stanice oslušuju mrežu prije slanja poruke.
- U slučaju sukoba stanica na mreži detektira različit sadržaj poruke od onog koji je poslan.
- Perzistentni CSMA.
- Neperzistentni CSMA.

### 1 - perzistentni CSMA

- Stanica oslušuje kanal. Ako je kanal slobodan, šalje poruku.
- Ako dođe do sukoba, čeka slučajno vrijeme i pokušava ponovo poslati poruku.
- Ako je kanal zauzet, čeka da se oslobodi.

AKO (stanica želi poslati poruku & kanal == slobodan) ONDA šalje.

Uspješnost slanja poruke ovisi o vremenu prijensa:

- Koliko dugo će kanal nakon što je primijećeno da je slobodan takav i ostati.
- Postoji mogućnost da neka druga stanica započne slanje poruke u međuvremenu.

# MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

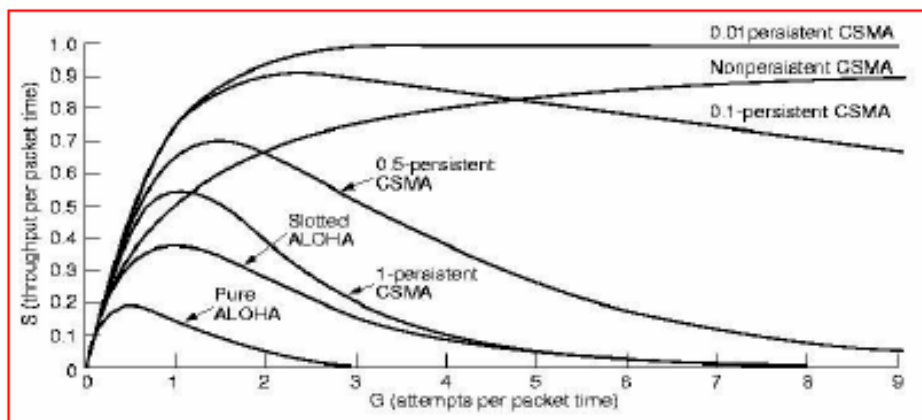
## CSMA (Carrier Sense Multiple Access)

### Neperzistentni (0 – perzistentni) CSMA

□ Ako je kanal zauzet, stanica ne nastavlja sa osluškivanjem da otkrije tačan trenutak kada će kanal postati slobodan, već čeka slučajno vrijeme do slijedećeg osluškivanja.

□ Posljedice:

- bolja iskoristivost,
- veća kašnjenja nego kod 1-perzistentnog CSMA.



### p-perzistentni CSMA

AKO (stanica spremna za slanje & kanal == slobodan) ONDA šalji sa vjerojatnošću  $p$ , odnosno čekaj slučajni period sa vjerojatnošću  $q=1-p$ .

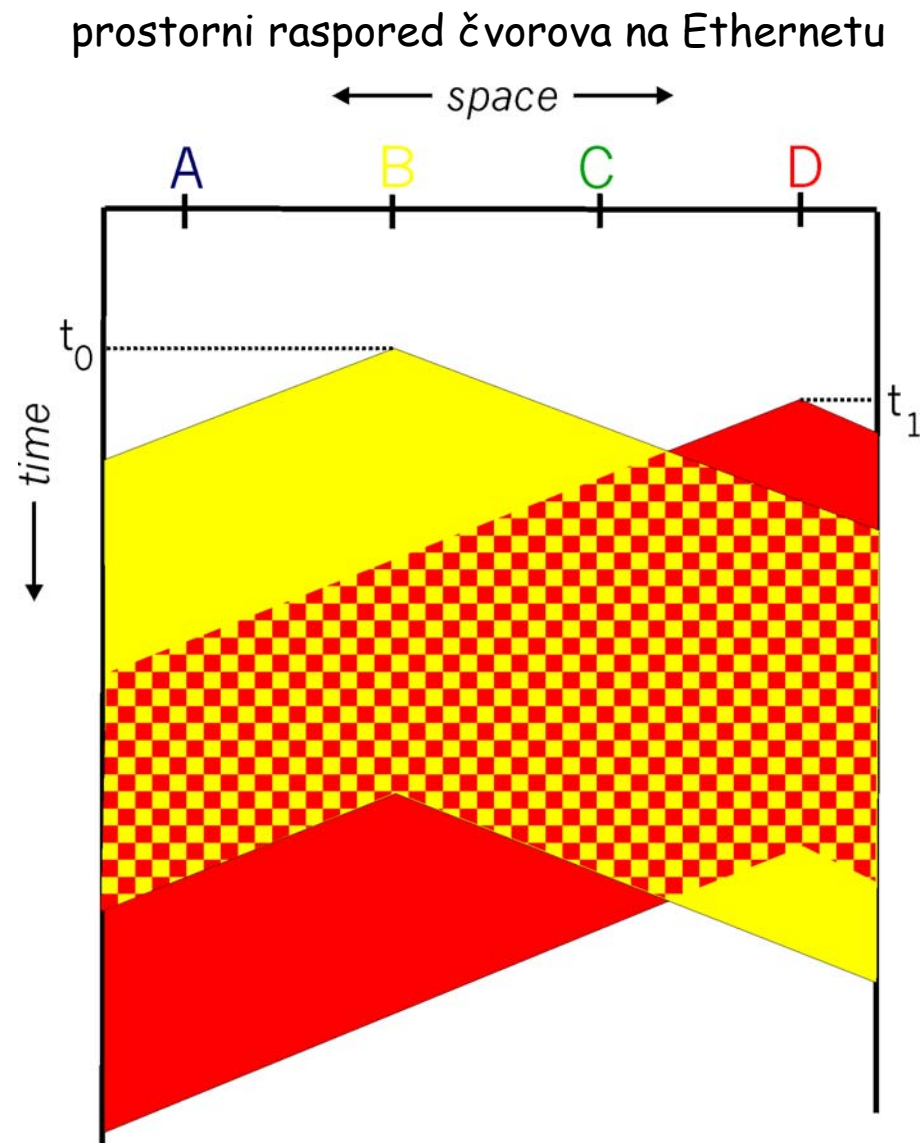
# MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

## CSMA sukob

sukobi se mogu desiti:  
propagacijsko kašnjenje  
znači da dva čvora ne mogu  
čuti jedan drugog tokom  
prijenosa.

sukob:  
vremenski uzaludan prijenos  
okvira (paketa).

primjedba:  
uloga udaljenosti i  
propagacijskog kašnjenja u  
određivanju vjerojatnosti  
sukoba.



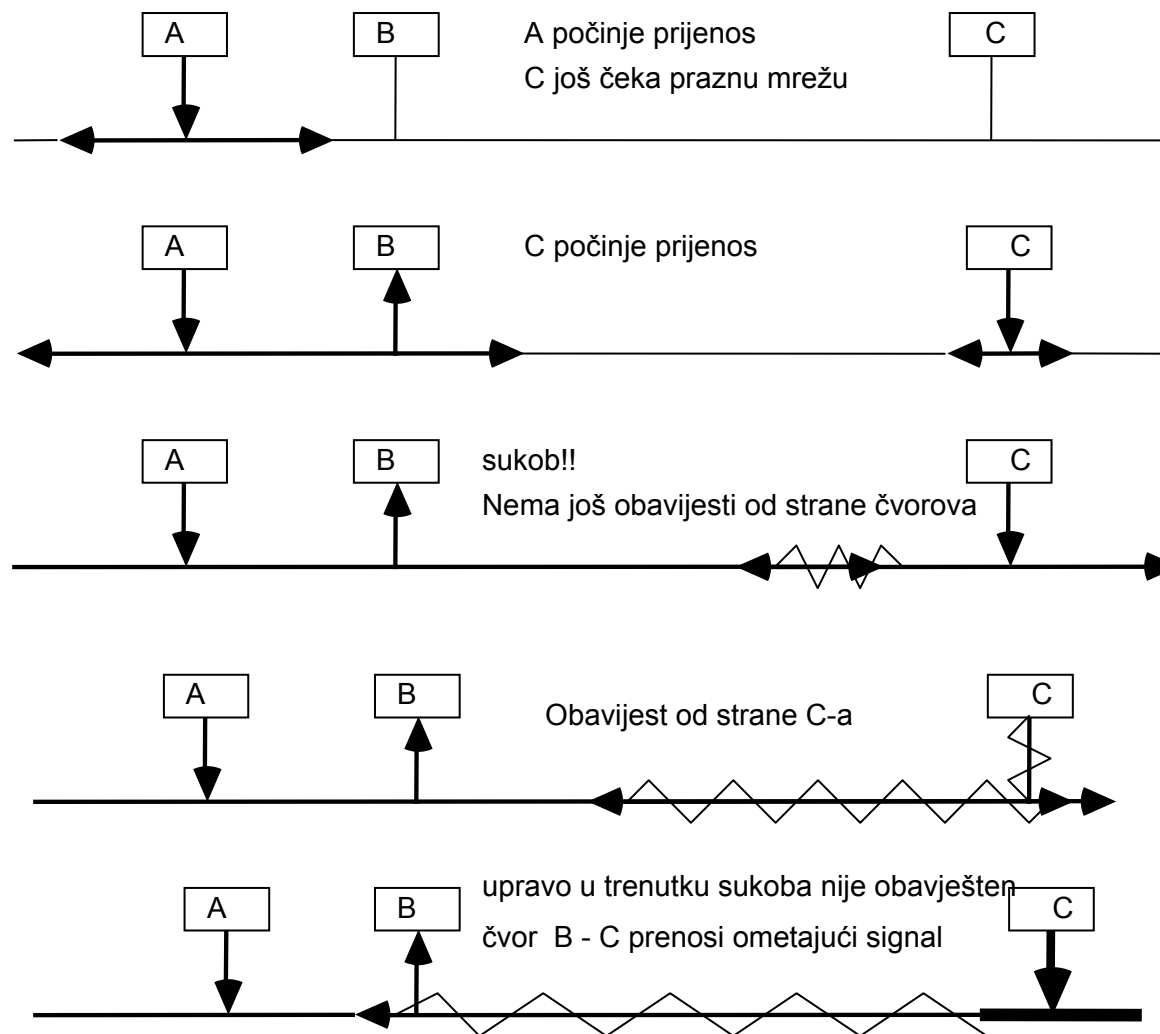
# MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

## CSMA/CD (Collision Detection)

- Dvije ili više stanice mogu istovremeno osjetiti da je kanal prazan (slobodan) i pokušati poslati poruku.
- Stanice koje šalju poruke mogu spoznati da je došlo do sukoba, usporedbom signala na mediju i poslanog signala.
- Nakon što otkrije sukob, stanica prekida slanje poruke, čak i ako je već poslala pola okvira poruke.
- Oni će također poslati kratke “ometajuće” signale da bi obavijestili sve stanice spojene na kanal da se dogodio sukob.
- Nakon toga, oni čekaju slučajno vrijeme (backoff) da kanal postane slobodan kako bi ponovo započeli prijenos.
- Ovaj protokol se naziva **CSMA/CD** (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection).
- Algoritam koji koristi CSMA/CD naziva se **Binary Exponential Backoff Algorithm**.

# MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

## CSMA/CD (Collision Detection)



B vidi ometajući signal – on odbija trenutni okvir ili paket.

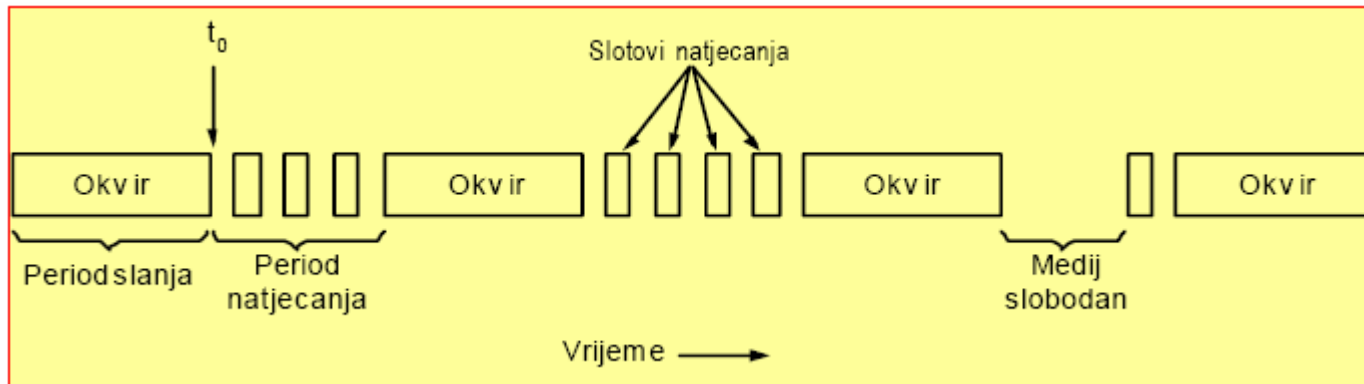
A također vidi ometajući signal – odbija trenutni okvir ili paket.



# MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

## CSMA/CD (Collision Detection)

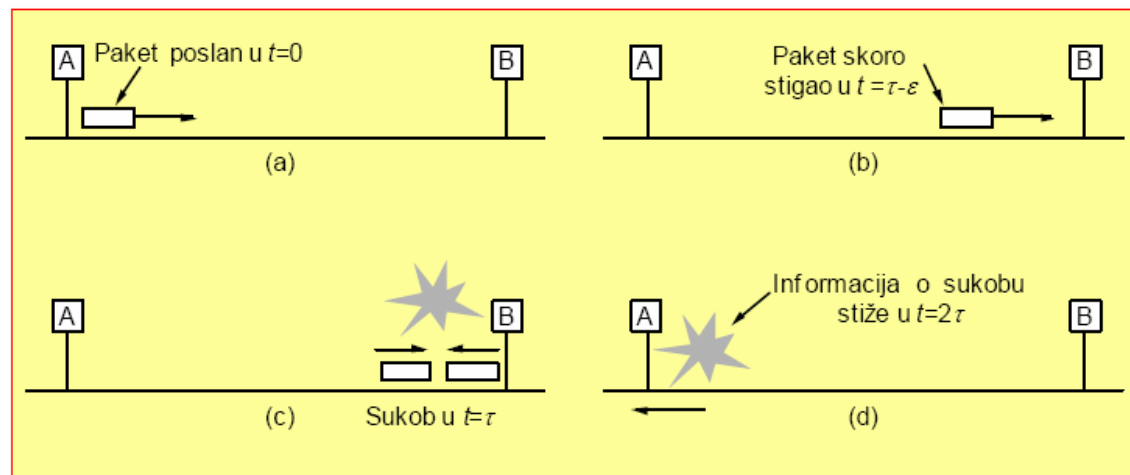
Konceptualni model CSMA/CD protokola:



### Period natjecanja:

Minimalno vrijeme detekcije sukoba na mediju:

$\tau$  - vrijeme propagacije između najudaljenijih stanica.



Stanica ne može biti sigurna da šalje bez sukoba dok ne istekne vrijeme  $2\tau$ .

Period natjecanja višekratnik vremena  $2\tau$ .

Sukobi u intervalu natjecanja mogu značajno narušiti performanse, pogotovo ako je komunikacijski kabel dugačak i ako su okviri koji se šalju kratki.

# MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

## CSMA/CD (Collision Detection)

### ❑ Binary Exponential Backoff Algorithm

- CSMA može ne samo detektirati sukob već može i obnoviti okvir (paket) iz njega.
- Nakon što se dogodi sukob, čvor mora čekati dok se ometajući signal ne prenese u cijelosti prije retransmisije okvira koji su rezultirali sukobom.
- Ako čvor započne prijenos ponovo kada kanal postane slobodan, drugi sukob će se dogoditi.
- Da bi se izbjegli višestruki sukobi, CSMA/CD zahtijeva da svaki čvor “kasni” sa prijenosom nakon sukoba prije pokušaja retransmisije.
- Algoritam koji koristi CSMA da bi zakasnio sa retransmisijom okvira, nakon sukoba, naziva se, kako smo ranije naveli **Binary Exponential Backoff Algorithm**.

# MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

## CSMA/CD (Collision Detection)

### □ Binary Exponential Backoff Algorithm

- Nakon detekcije sukoba, stanica čeka 0 ili 1 okvir.
- Ako ponovo dođe do sukoba, odabire se vrijeme čekanja između 0, 1, 2 ili 3 okvira
- Ako se sukob ponovi čeka između 0 i  $2^3-1$  okvira.
- Najveće vrijeme čekanja je  $2^{10}-1$  (što odgovara 10 uzastopnih sukoba).
- Nakon 16 sukoba dojavljuje se greška.
- Algoritam se adaptira s obzirom na broj stanica.

# MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

## CSMA/CD (Collision Detection)

- Skraćeni Binary Exponential Backoff

- Pokušaji := 0;
- Broj pokušaja ograničiti na 16 i Backoff Limit na 10.  
DOK

{ (Okvir NIJE uspješno prenešen)

AND (Pokušaji < Ogran. pokušaja) }

K := Min (Pokušaji, Backoff Limit)

R := Slučajno (0,  $2^k-1$ )

kašnjenje := R \* trajanje\_okvira;

Čekati (kašnjenje)

Povećati Pokušaji;

Kraj DOK

- Ovaj algoritam daje "**statističku nepristrasnost (fairness)**" u dijeljenju propusnog opsega.

# MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

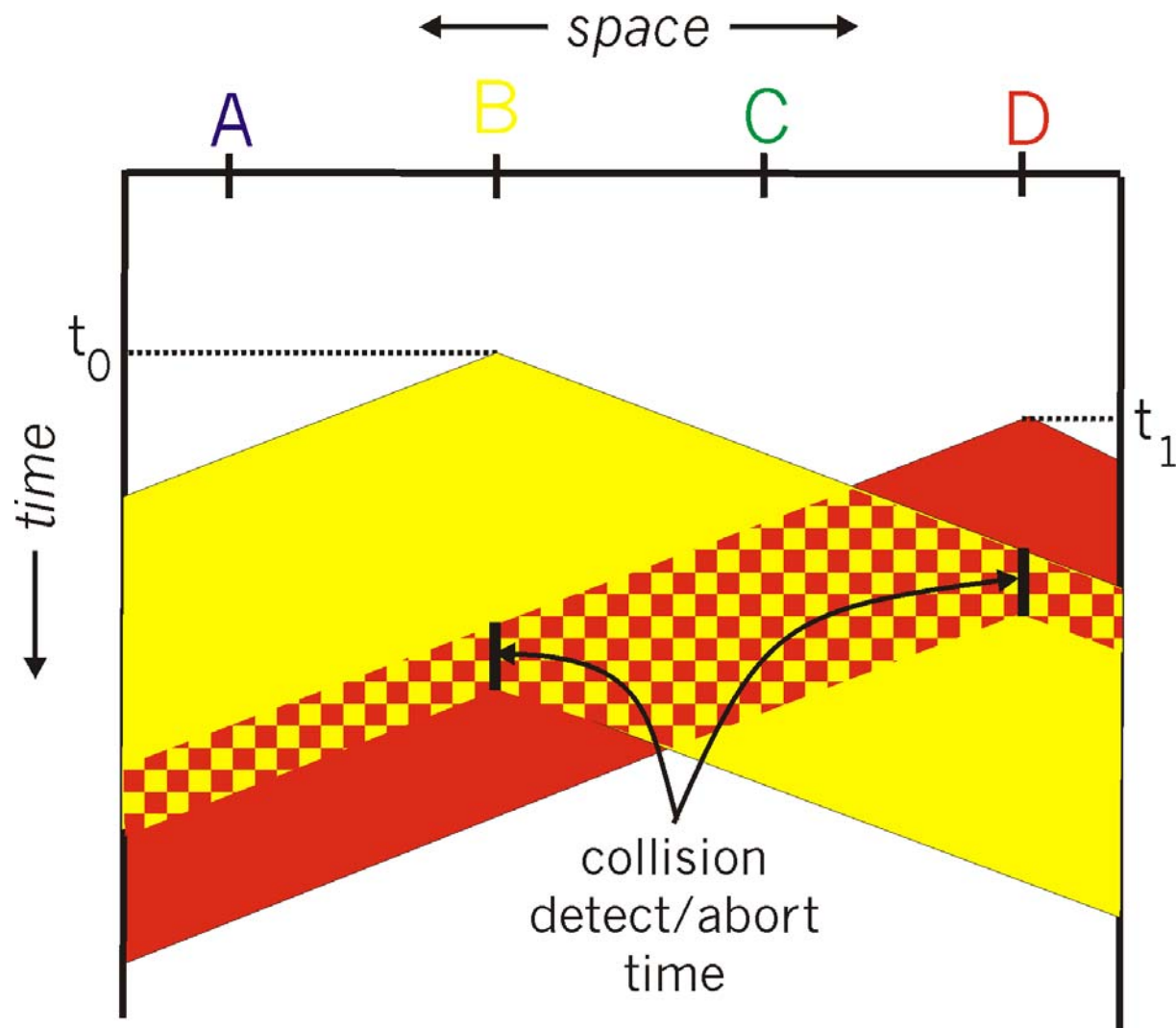
## CSMA/CD (Collision Detection)

### CSMA/CD (sumarno):

- ❑ Sukobi se detektiraju za kratko vrijeme.
- ❑ Sukobljeni prijenosi se prekidaju, reduciranje gubitka kanala.
- ❑ Perzistentna ili neperzistentna retransmisija.
- ❑ Detekcija sukoba:
  - jednostavna žičanim LAN-ovima: mjerenje snage signala, kompariranje prijenosa, primanje signala,
  - teška u wireless LAN-ovima: prijemnik zatvoren dok traje prijenos.
- ❑ Ljudska analogija: ućtivi sugovornik.

# MAC Protokoli sa slučajnim pristupom

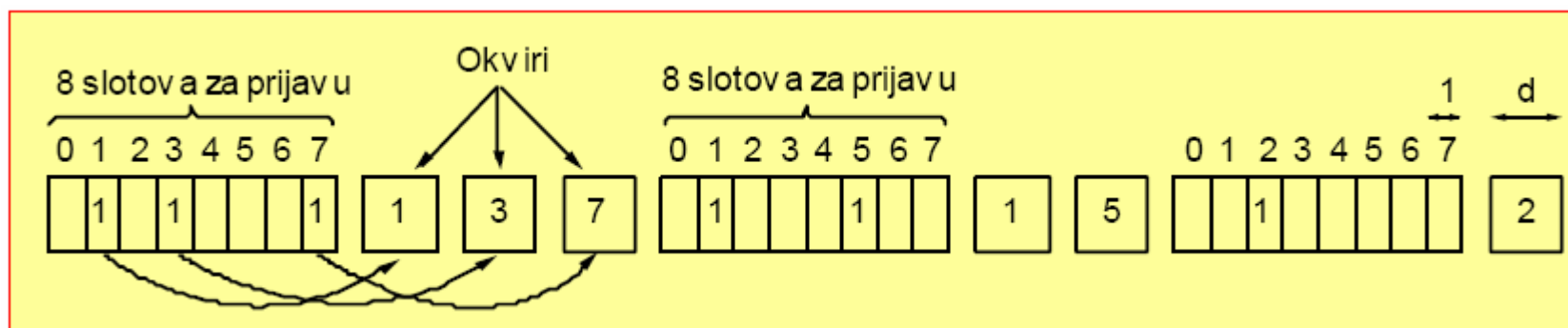
## CSMA/CD (Collision Detection)



## 7.3. MAC Protokoli bez sukoba

### Protokol sa mapiranjem bitova

- ❑ Jedan “prozor sukoba” podijeljen na bitove, stanice koriste da najave da žele poslati poruku. Nakon najave stanice šalju poruke po redoslijedu određenom prioritetima, pa nema sukoba na mreži. Naziva se još i “rezervacijski protokol”.

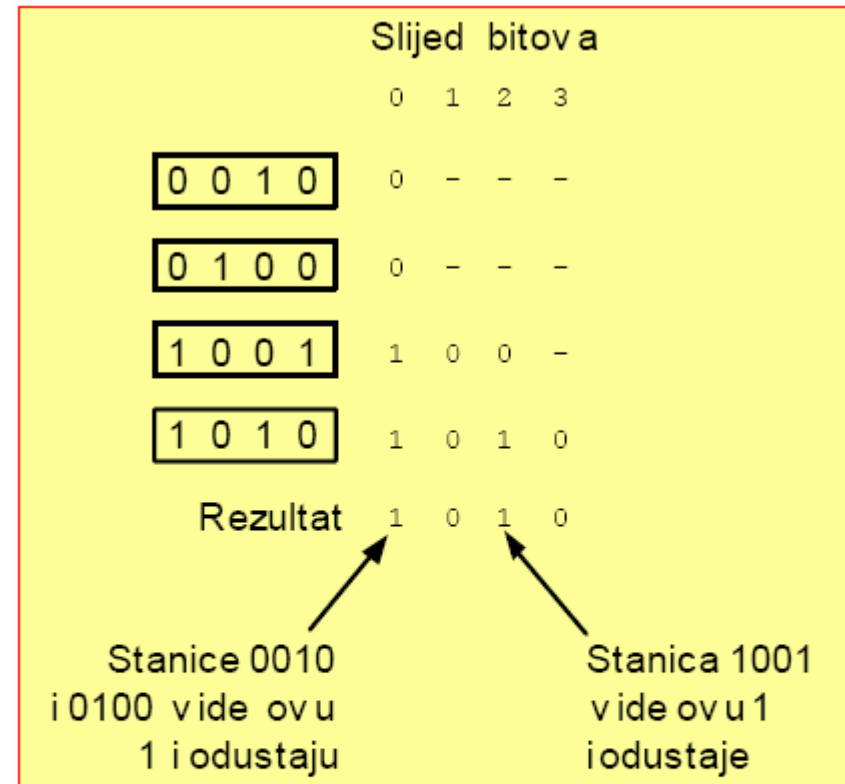


- ❑ Koje su prednosti i nedostaci ove metode? Razmotrite slučaj velikog i malog opterećenja mreže.
  - Malo opterećenje – efikasnost  $d/(d+N)$ ,  $d$  – broj bita okvira.
  - Veliko opterećenje – efikasnost  $d/(d+1)$ , preopterećenje 1 bit po okviru.
  - Broj bitova “prozora sukoba” jednak broju stanica.

# MAC Protokoli bez sukoba

## Binarno odbrojavanje

- ❑ U prozoru sukoba svaka stanica šalje svoj identifikacijski broj.
- ❑ Na mreži se nad njima izvodi operacija **logičko ILI**.
- ❑ Pojedina stanica prepoznaje da je dobila pravo na slanje, jer nijedna druga stanica nije imala veći identifikacijski broj.
- ❑ **Efikasnost  $d/(d+\log_2 N)$** , a može se povećati do 100 % ako se ILI operacija provodi nad adresama predajnika počevši od bitova najviše važnosti.



Na ovom se konceptu temelji CAN protokol



## 7.4. MAC Protokoli sa ograničenim sukobom

### Dinamičko dijeljenje kanala

- ❑ Protokoli sa višepokušajnim pristupom dobro funkcioniraju kod manjih opterećenja mreža (kada je manja vjerojatnost sukoba).
- ❑ Kod većih opterećenja bolje funkcioniraju protokoli bez sukoba.
- ❑ Protokoli sa ograničenim sukobima koriste prednosti obaju protokola:
  - Stanice se podijele u grupe. Odredi se da u vremenskom prozoru 0 mogu slati samo stanice iz grupe 0, u vremenskom prozoru 1 stanice iz grupe 1, itd.
  - Smanjuje se mogućnost sukoba za svaku stanicu.

# MAC Protokoli sa ograničenim sukobom

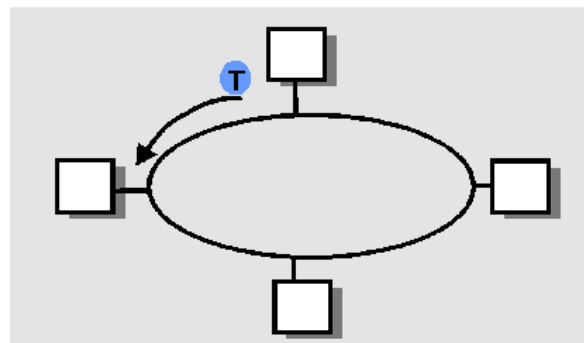
## Dinamičko dijeljenje kanala

### Polling (glasanje):

- Master stanica (čvor) “poziva” slave stanice da šalju po redu.
- Poruke “Request to Send”, “Clear to Send”.
- Interes:
  - polling overhead
  - latentnost
  - pojedinačna tačka prekida (master)

### Token passing (predaja zaloga):

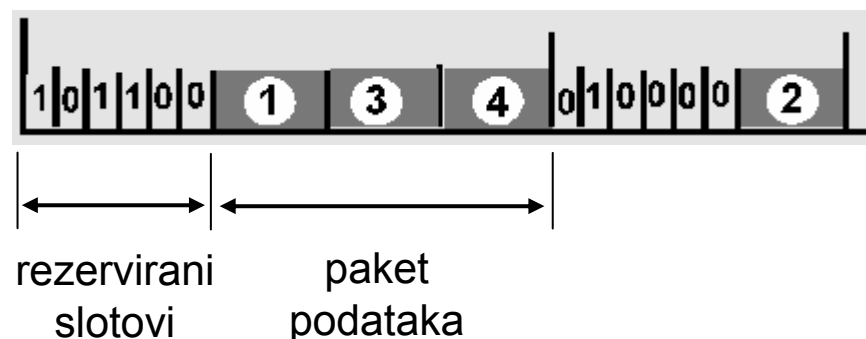
- Upravljanje prolazom zaloga od jednog do drugog čvora (slijedećeg u nizu).
- Poruka zaloga
- Interes:
  - token overhead
  - latentnost
  - pojedinačna tačka prekida (zalog)



# MAC Protokoli sa ograničenim sukobom

## Rezervirani protokoli

- **Distribuirani Polling:**
- vrijeme podijeljeno u slotove,
- počinje sa  $N$  kratkih rezerviranih slotova:
  - vrijeme rezerviranog slota jednako je propagacijskom kašnjenju od kraja do kraja kanala,
  - stanica sa porukom za slanje šalje rezervaciju,
  - rezervacija se vidi sa svih stanica,
- nakon rezerviranih slotova, prijenos poruka odvija se po prioritetu.



## 7.5. LAN tehnologije

### Sadržaj

- Adresiranje.
- Ethernet.
- Hub, preklopnik.
- PPP.

## 7.5.1. MAC adresiranje

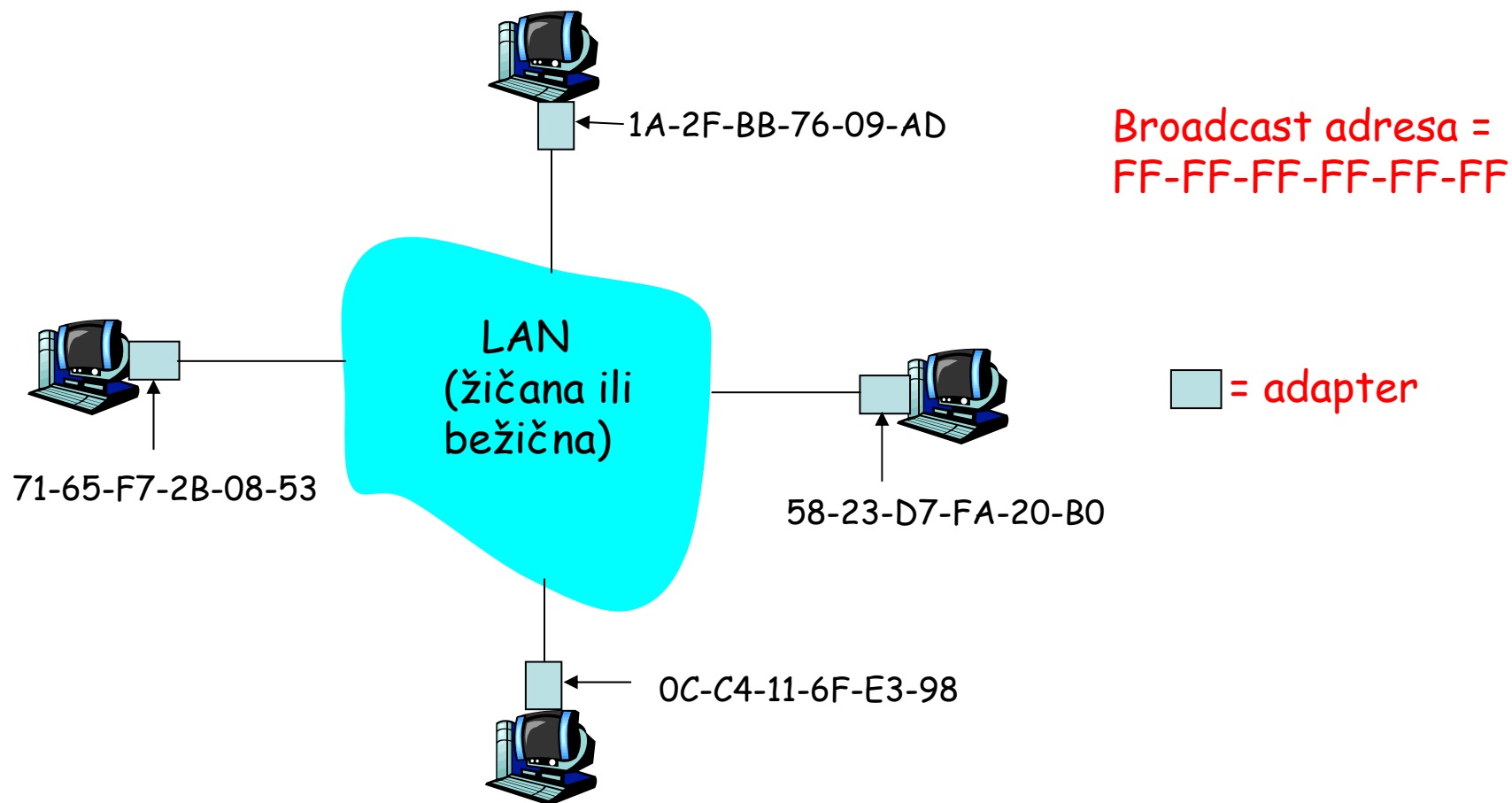
### MAC adresa

- 32-bitna IP adresa:
  - adresa mrežnog sloja,
  - koristi se za predaju datagrama ciljnoj IP podmreži.
- MAC (ili LAN ili fizička ili Ethernet) adresa:
  - koristi se za predaju datagrama od jednog sučelja do drugog, fizički povezanog sučelja (ista mreža).
  - 48-bitna MAC adresa (za većinu LAN-ova) upisana u ROM-u adaptera.
- Dodjeljivanje MAC adrese od strane IEEE administracije.
- Proizvođači kupuju dijelove MAC adresnog prostora.
- Analogija:
  - (a) MAC adresa: slična broju socijalnog osiguranja
  - (b) IP adresa: slična poštanskoj adresi
- MAC adresa → prenosivost
  - može prenijeti LAN karticu sa jednog LAN-a na drugi.

# MAC adresiranje

## LAN adresa i adapter

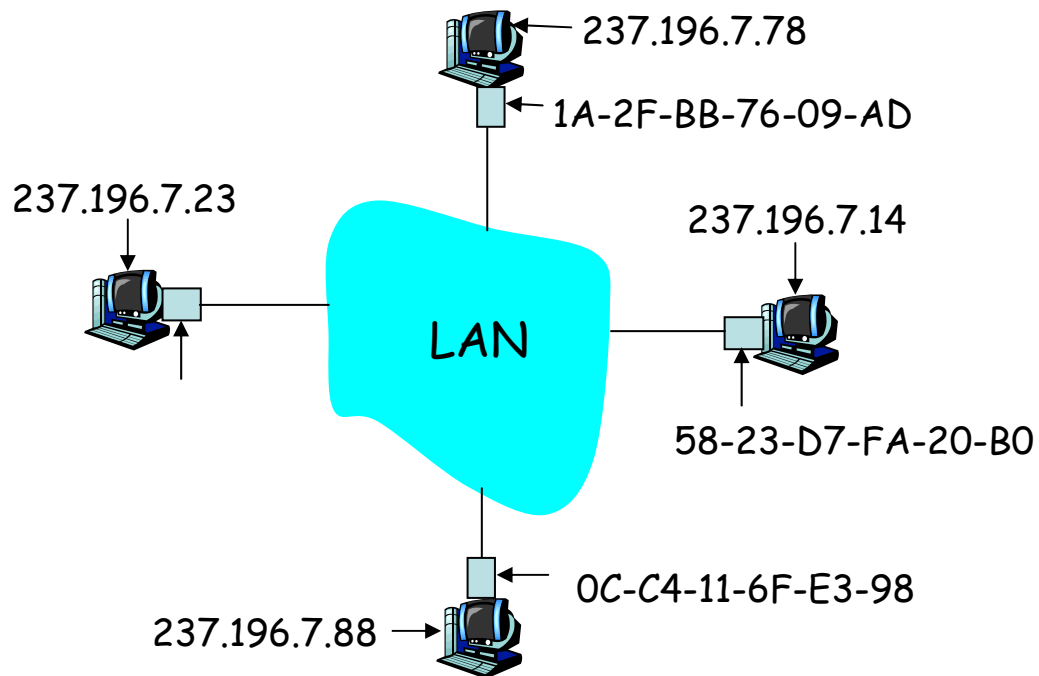
Svaki adapter na LAN-u ima jedinstvenu LAN adresu.



# MAC adresiranje

## ARP: Address Resolution Protocol

Pitanje: kako odrediti  
MAC adresu B-a  
znajući B-ovu IP adresu?



- Svaki IP čvor (Host, Router) na LAN-u ima **ARP** tabelu.
- ARP Tabela: IP/MAC preslikavanje adresa za neke LAN čvorove:

< IP adresa; MAC adresa; TTL >

- TTL (Time To Live): vrijeme nakon kojeg će preslikana adresa biti zaboravljena (tipično 20 min).

# MAC adresiranje

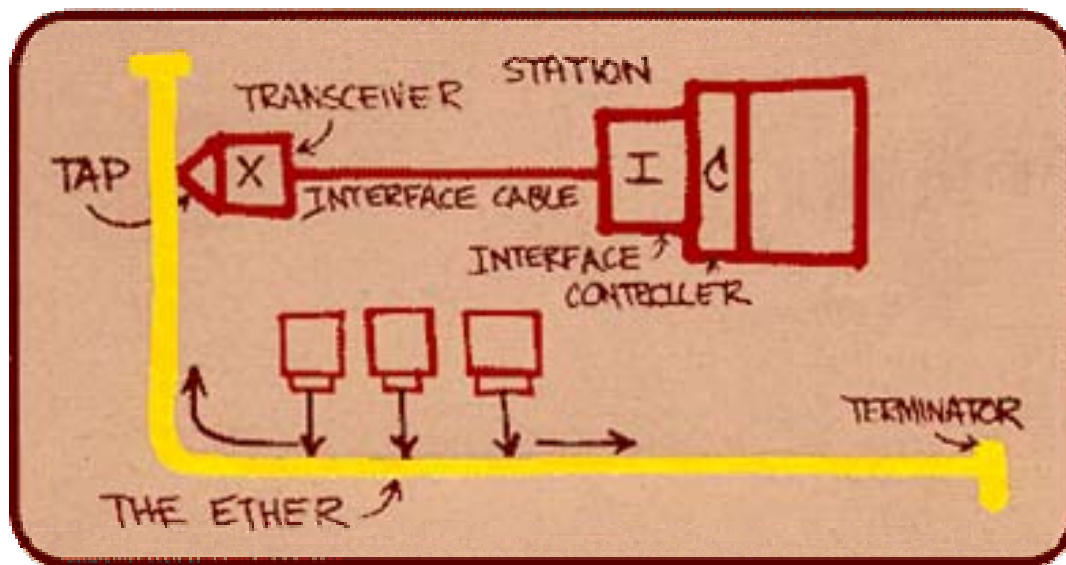
## ARP protokol: iste LAN mreže

- A želi poslati datagram do B, a B-ova MAC adresa nije u ARP tabeli.
- **Slanje** ARP “upitnog” paketa, sadrži B-ovu IP adresu
  - Ciljna MAC adresa  
= FF-FF-FF-FF-FF-FF
  - sve stanice na LAN-u primaju ARP upit.
- B prima ARP paket, odgovara A-u sa svojom (B-ov) MAC adresom.
  - Okvir poslan do A sadrži MAC adresu.
- Par (IP, MAC) adresa pohranjuje se u njegovu ARP tabelu dok informacija ne zastari (times out)
  - meko stanje: zastarjela informacija ide “daleko” dok se ne osvježi.
- ARP je “plug-and-play”:
  - čvorovi kreiraju svoje ARP tabele bez intervencije od strane administratora.



## 7.5.2. Ethernet

- “Dominantna” žičana LAN tehnologija:
- Cijena \$20 za 100Mbps!
- Prva najviše korištena LAN tehnologija.
- Jednostavnija, jeftinija od LAN-ova za zalogom i ATM-a,
- Brzine prenosa u opsegu: 10 Mbps – 10 Gbps

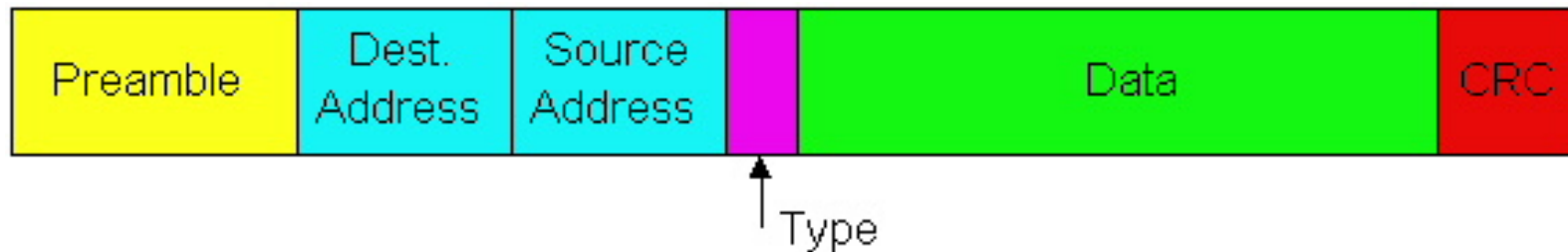


Metcalfe's Ethernet sketch

# Ethernet

## Struktura Ethernet okvira

- Predajnik (adapter) sažima IP datagram (ili drugi paket mrežnog sloja) u Ethernet okvir:



### Preambula:

- 7 bajta 10101010 iza kojih slijedi jedan bajt 10101011 (start of frame delimiter)
- koristi se za sinhronizaciju sata prijemnika.
- **Adrese:** 6 bajta
  - višeodredišno – slanje grupi stanica,
  - sveodredišno – (dest=sve jedinice) sve stanice u mreži.
- **Type:** indicira protokol više razine (najviše IP, može i Novell IPX i AppleTalk)
- **CRC:** 4 bajta.

# Ethernet

## Korištenje CSMA/CD

- Nema slotova.
- Adapter ne šalje ako opaža da neki drugi adapteri vrše prijenos, to jest “**carrier sense**”.
- Prijenosni adapteri prekidaju prijenos kada osjeti da drugi adapter vrši prijenos, **detekcija sukoba**.
- Prije pokušaja retransmisije, adapter čeka slučajno vrijeme, tj. **slučajni pristup (pokušaj)**.

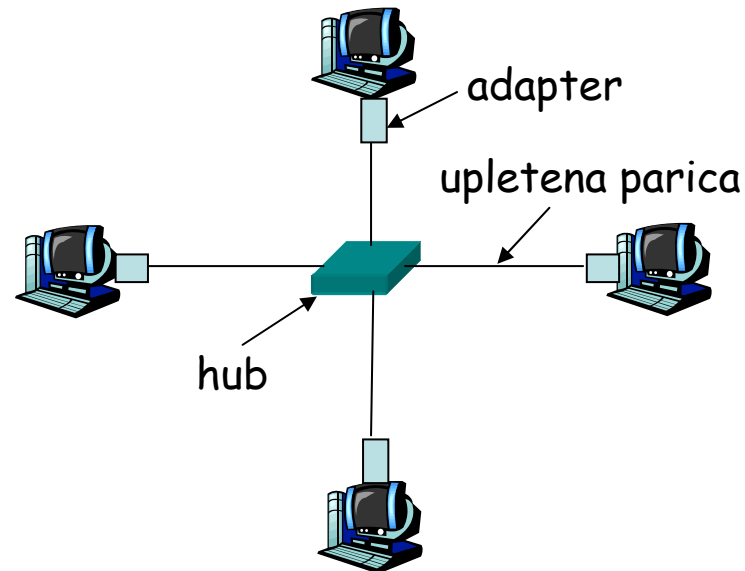
### Algoritam

1. Adapter prima datagram od mrežnog sloja i kreira okvir.
2. Ako adapter osjeti da je kanal slobodan, započinje slanje okvira. Ako osjeti da je kanal zauzet, čeka dok kanal ne bude slobodan i nakon toga započinje slanje.
3. Ako adapter šalje cijeli okvir bez detektiranja drugog prijenosa, adapter je “završio sa okvirom”!
4. Ako adapter detektira drugi prijenos dok je njegov prijenos u toku, prekida prijenos i šalje ometajući signal.
5. Nakon prekida, adapter unosi **exponential backoff**: nakon  $m$ -tog sukoba, adapter odabire  $K$  slučajno iz  $\{0, 1, 2, \dots, 2^m - 1\}$ . Adapter čeka  $K \cdot 512$  vremenski bita i vraća se na korak 2.

# Ethernet

## 10BaseT i 100BaseT Ethernet

- 10/100 Mbps brzina; kasnije nazvan “brzi ethernet”.
- Fizička veza između uređaja ostvarena upletenom paricom.
- Stanice (čvorovi) povezani hub-om: “zvijezda topologija”; 100 m maksimalna udaljenost između stanica i hub-a.



Hubovi su obnavljači fizičkog sloja:

- Bitovi dolaze od jedne linije do drugih linija istom brzinom.
- Nema pohranjivanja okvira.
- Nema CSMA/CD na hub-u: adapteri detektiraju sukobe.
- Osiguravaju funkcionalnost mrežnog menadžmenta.

# Ethernet

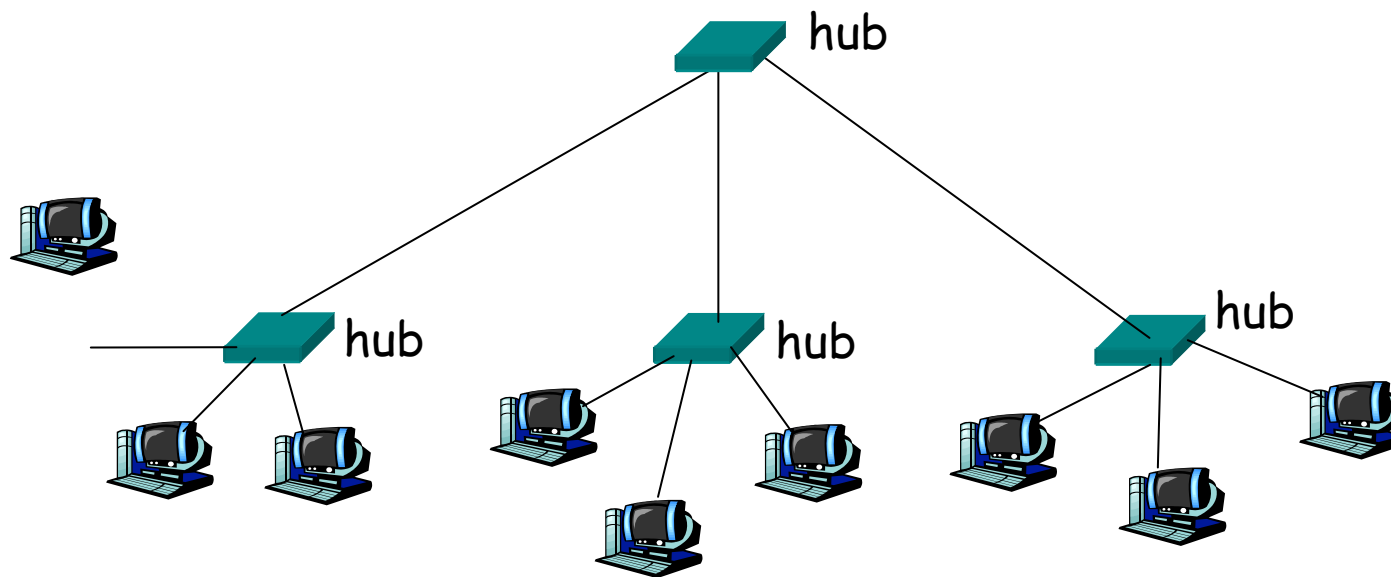
## Gbit Ethernet

- Koristi standardni Ethernet format okvira.
- Omogućuje tačka-tačka veze i dijeljenje broadcast kanala.
- U modu dijeljenja koristi se CSMA/CD; kratke udaljenosti između čvorova zahtijevaju se zbog efikasnosti.
- Koristi hub-ove, nazvane “Buffered Distributors”
- Dvosmjerni prijenos na 1 Gbps za tačka-tačka linije (veze).
- 10 Gbps danas!

## 7.5.3. Međupovezivanje – hub i preklopnik

### Povezivanje hub-om

- “Backbone” hub povezuje LAN segmente.
- Proširuje maksimalnu udaljenost između čvorova. Domene pojedinačnih segmenata sukoba tvore jednu veliku domenu sukoba.
- Ne može povezivati 10BaseT & 100BaseT.



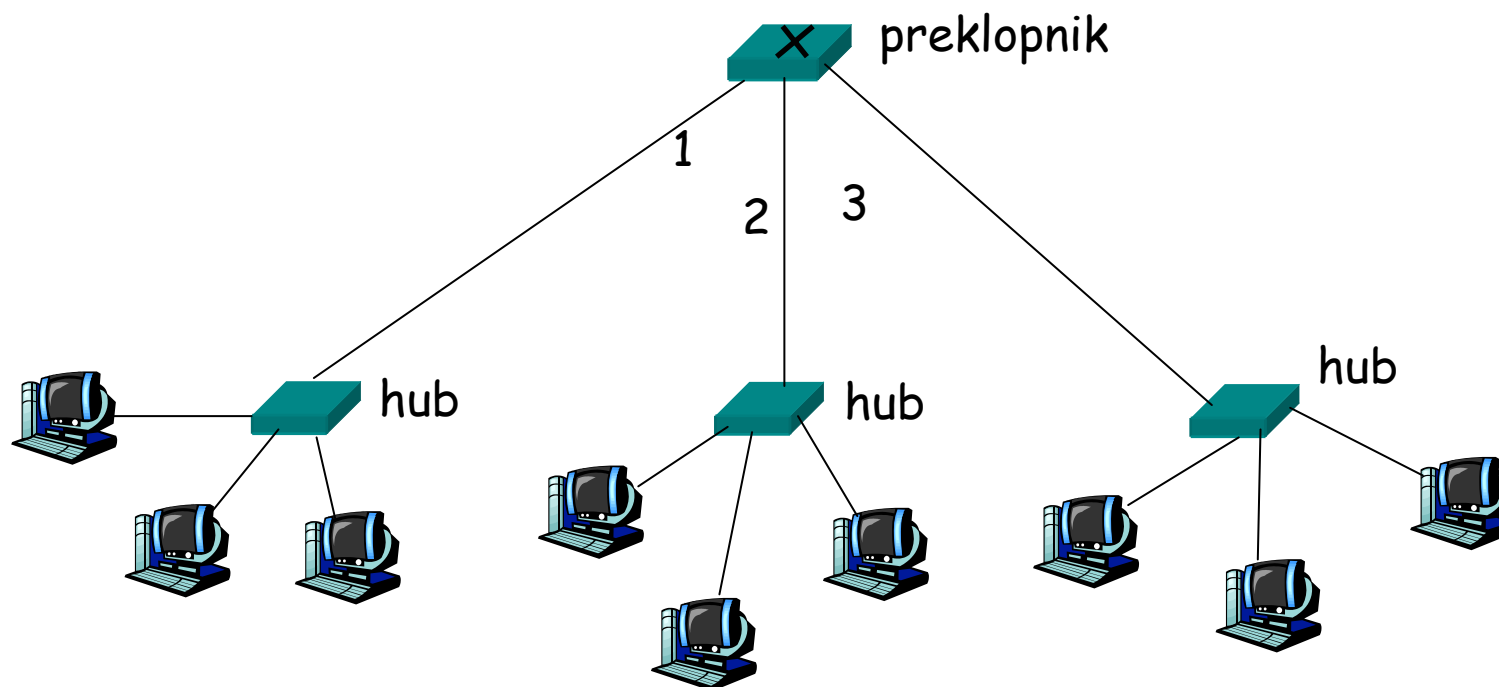
# Međupovezivanje – hub i preklopnik

## Preklopnik

- Uređaj podatkovnog sloja
  - pohranjuje i prosljeđuje Ethernet okvire,
  - Ispituje zaglavlje okvira i **selektivno** usmjeravaju okvire na temelju njihovih MAC ciljnih (destinacijskih) adresa.
  - kada je okvir prosljeđen na segment, koristi CSMA/CD za pristup segmentu.
- Transparentan
  - stanice nisu “svjesne” prisustva preklopnika
- Plug-and-play, samoučeći
  - preklopnici ne trebaju biti konfigurirani.

# Međupovezivanje – hub i preklopnik

## Preklopnik – prosljeđivanje



- Kako odrediti na koji LAN segment poslati (proslijediti) okvir?
- Slično problemu rutiranja.



## Međupovezivanje – hub i preklopnik

### Preklopnik - samoučenje

- Preklopnik ima **tabelu preklapanja**.
- Pristup tabeli preklapanja:
  - (MAC Address, Interface, Time Stamp)
  - pristup tabeli može biti otežan (TTL može biti 60 min)
- Preklopnik **uči** koje stanice mogu biti dostupne i kroz koja sučelja
  - kada se okvir primi, preklopnik “uči” lokaciju predajnika: dolazeći LAN segment.
  - pohranjuje se par predajnik/lokacija u tabelu preklapanja.

## Međupovezivanje – hub i preklopnik

### Preklopnik – filtriranje/prosljeđivanje

#### Kada preklopnik primi okvir:

index switch table using MAC dest address

**if** entry found for destination

**then**{

**if** dest on segment from which frame arrived

**then** drop the frame

**else** forward the frame on interface indicated

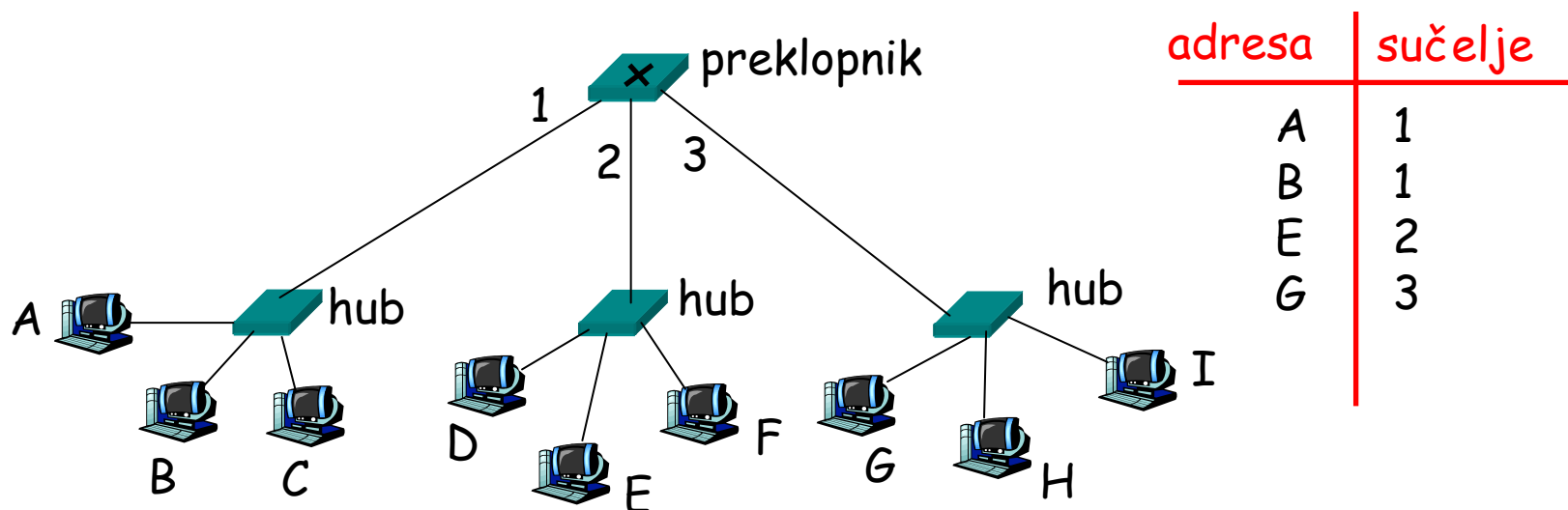
}

**else** flood

# Međupovezivanje – hub i preklopnik

## Primjer preklopnika

Pretpostavimo da C šalje okvir D-u.

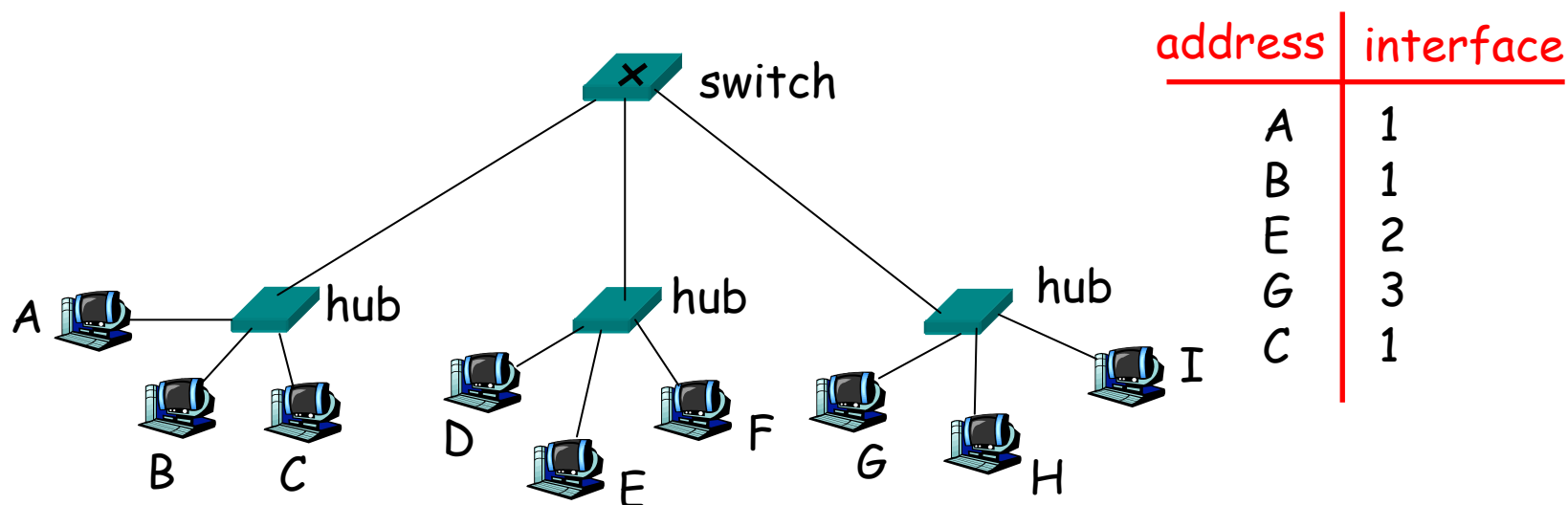


- Preklopnik prima okvir od C-a
  - provjeriti u tabeli da je C na sučelju 1
  - budući da D nije u tabeli, preklopnik prosljeđuje okvir u sučelja 2 i 3.
- D prima okvir.

# Međupovezivanje – hub i preklopnik

## Primjer preklopnika

Pretpostavimo da D vraća nazad okvir C-u.

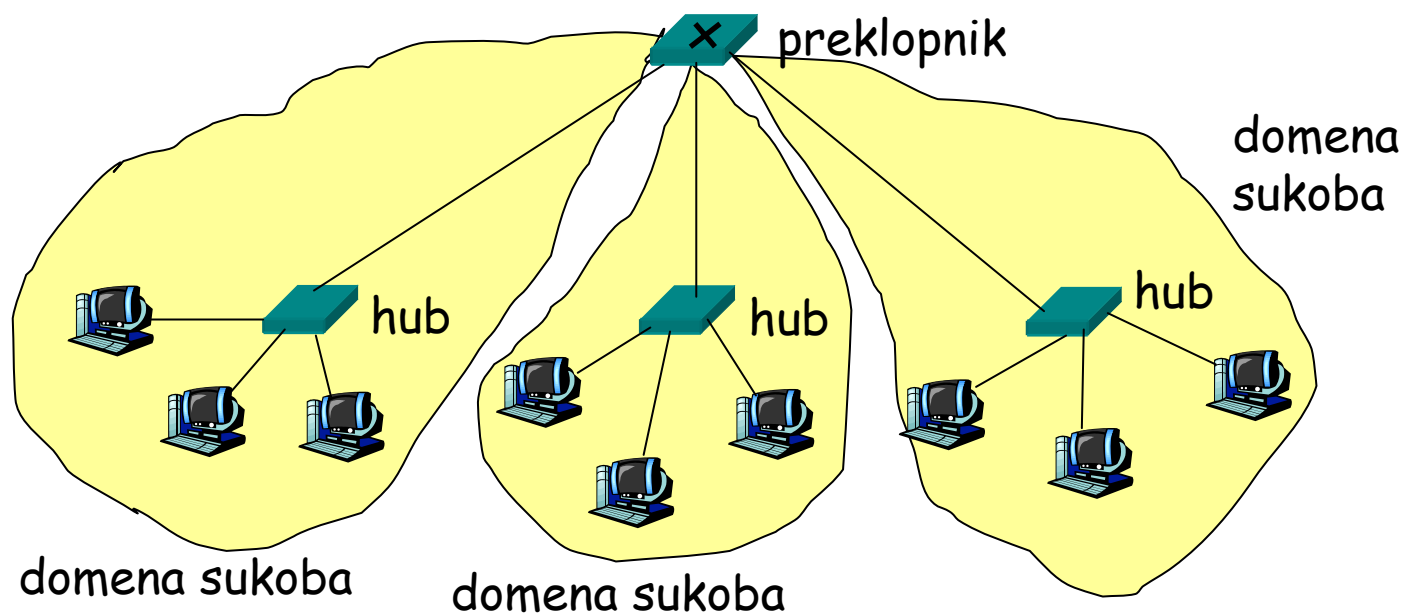


- Preklopnik prima okvir od D-a
  - provjeriti u tabeli da je D na sučelju 2
  - budući da je C u tabeli, preklopnik prosljeđuje okvir samo sučelju 1.
  - C prima okvir.

# Međupovezivanje – hub i preklopnik

## Preklopnik – izolacija prometa

- Preklopnik dijeli podmrežu u LAN segmente.
- Preklopnik **filtrira** pakete:
  - okviri istih LAN segmenta obično se ne prosljeđuju drugim LAN segmentima.
  - segmenti bivaju odvojeni **domenama sukoba**.



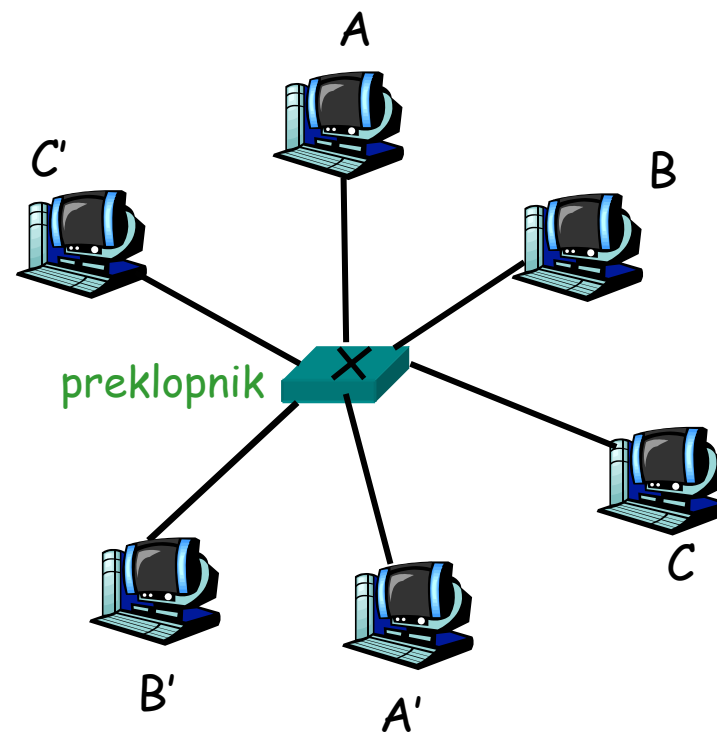
# Međupovezivanje – hub i preklopnik

## Preklopnik – više sučelja

- Preklopnik sa više sučelja.
- Stanice direktno povezane na preklopnik.
- Nema sukoba, dvosmjerni prijenos.

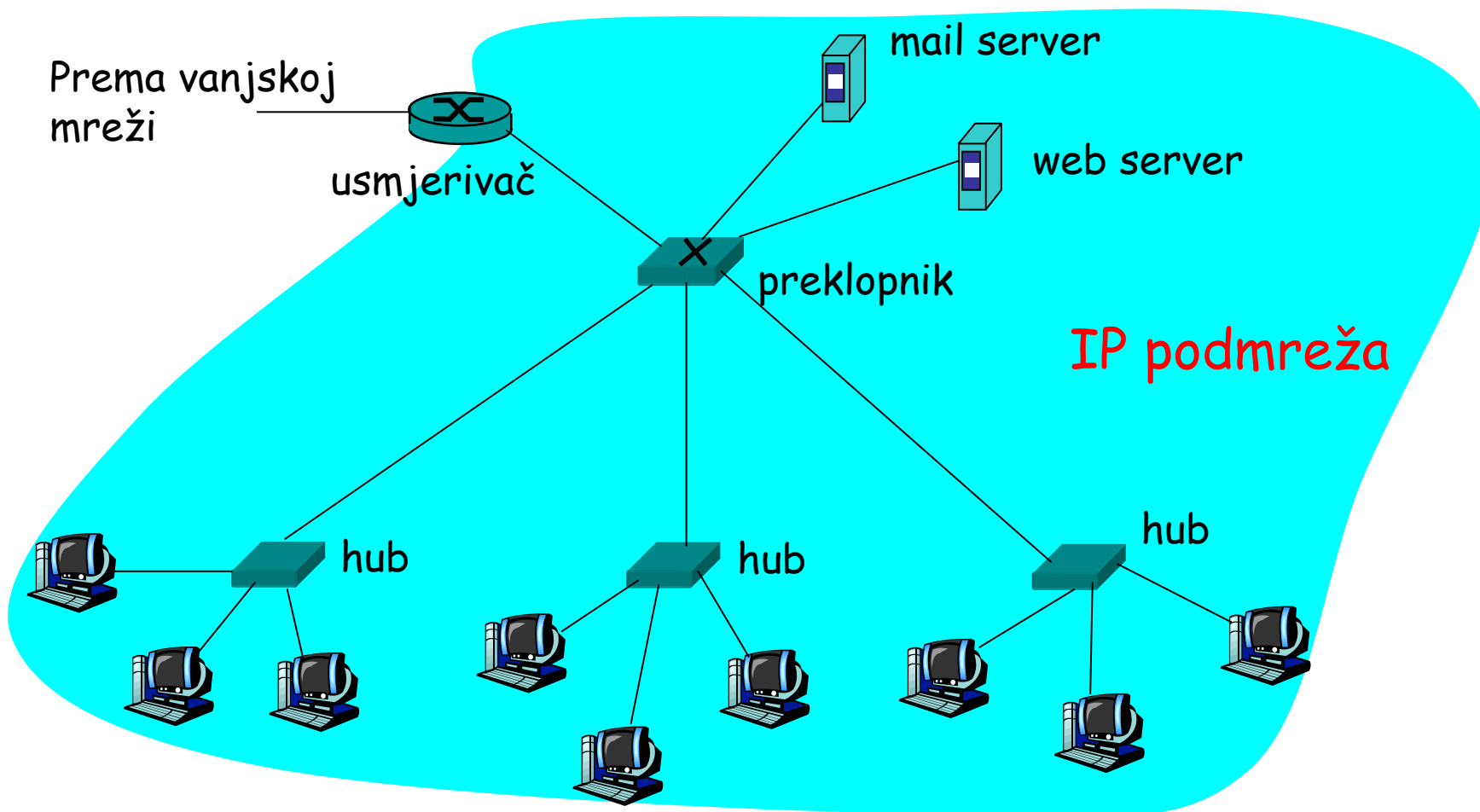
**Preklapanje:** A-to-A' i B-to-B' istovremeno, bez sukoba.

- **“cut-through” preklapanje:** okvir prosljeđen od ulaznog do izlaznog porta bez prethodne kolekcije cjelokupnog okvira
  - lagana redukcija latentnosti.
- kombinacija dijeljenja/posvećivanja (shared /dedicated), 10/100/1000 Mbps sučelja.



# Međupovezivanje – hub i preklopnik

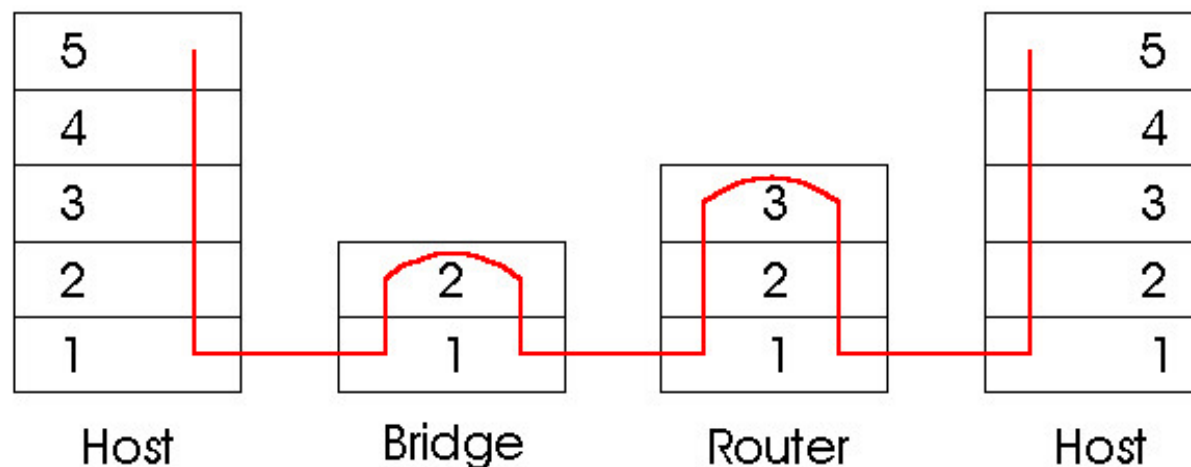
## Preklopnik – institucionalna mreža



# Međupovezivanje – hub i preklopnik

## Preklopnik – usporedba sa usmjerivačem

- Oba uređaja pohranjuju i prosljeđuju podatke.
  - usmjerivači: uređaji mrežnog sloja (ispituje zaglavljia mrežnog sloja)
  - preklopnici su uređaji podatkovnog sloja
- Usmjerivači održavaju tabele usmjeravanja (rutiranja), implementiraju algoritme rutiranja.
- Preklopnici održavaju tabele prekidanja, implementiraju filtriranje, algoritme učenja.





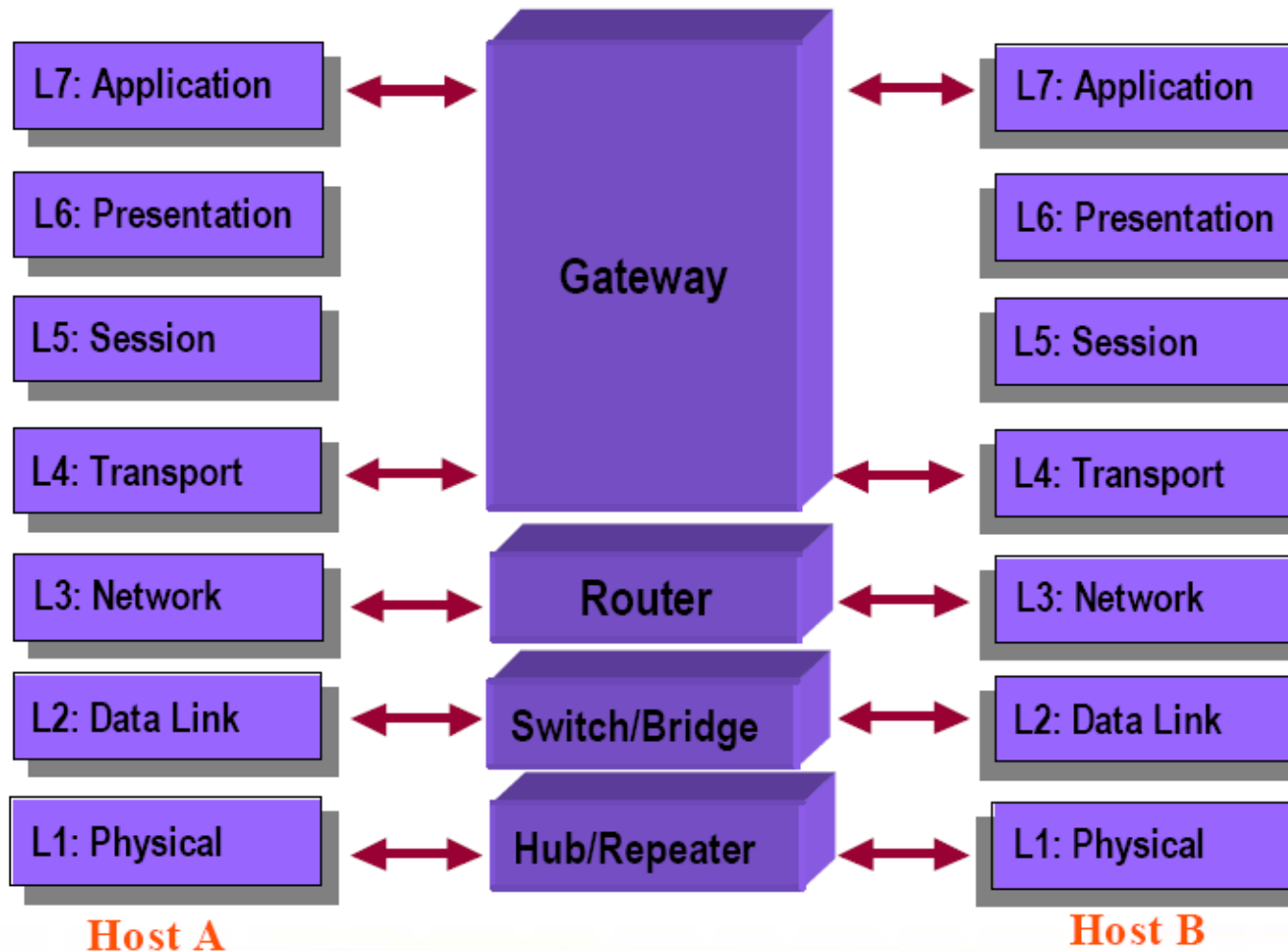
## Međupovezivanje – hub i preklopnik

### Usporedba preklopnika, hub-a i usmjerivača

	<u>hubs</u>	<u>routers</u>	<u>switches</u>
traffic isolation	no	yes	yes
plug & play	yes	no	yes
optimal routing	no	yes	no
cut through	yes	no	yes

## Međupovezivanje u OSI modelu - pregled

# Interconnection Devices



## 7.5.4. PPP upravljanje

### PPP (point-to-point protocol) logičko upravljanje

- Jedan predajnik, jedan prijemnik, jedna veza:  
jednostavnije od broadcast veze:
  - nema MAC-a,
  - nema potrebe za eksplicitnim MAC adresiranjem,,
  - npr., dialup veza, ISDN veza.
- Popularni point-to-point DLC protokoli:
  - PPP (point-to-point protokol) – znakovno orijentiran
  - HDLC: High level data link control (veza podataka koja se koristi promatra se kao “visoki sloj” u slogu protokola – bitovno orijentiran).

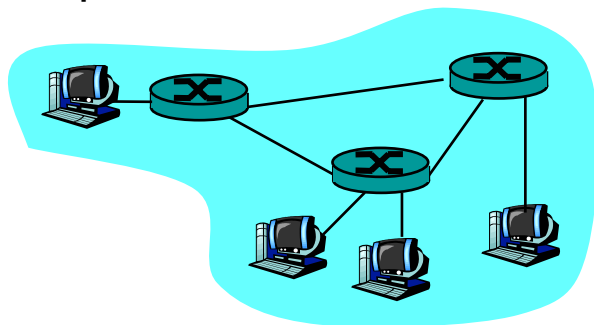
## 7.5.5. Virtualizacija mreža

### Internet – virtualizirana mreža

- Virtualizacija resursa: moćna apstrakcija u sistemskom inženjeringu:
- Primjeri: virtualna memorija, virtualni uređaji
  - virtualne mašine: npr., java
  - IBM VM os iz 1960-tih, odnosno 70-tih.
- Apstrakcija slojeva: ne bavi se detaljima niskog sloja, već samo njegovom apstrakcijom.

1974: mnoštvo nepovezanih mreža

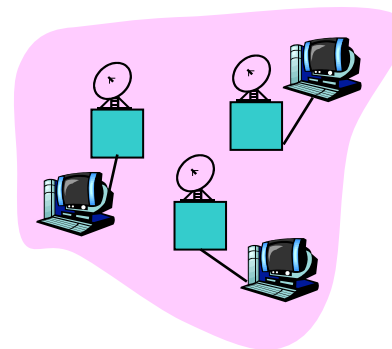
- ARPAnet
- podaci prenošeni preko kablovskih mreža
- paketna satelitska mreža (Aloha)
- radio paketna mreža



ARPAnet

... razlikuju se u:

- načinu adresiranja
- formatima paketa
- ispravljanju greški
- usmjerivanju (rutiranju)



satellite net

# Virtualizacija mreža

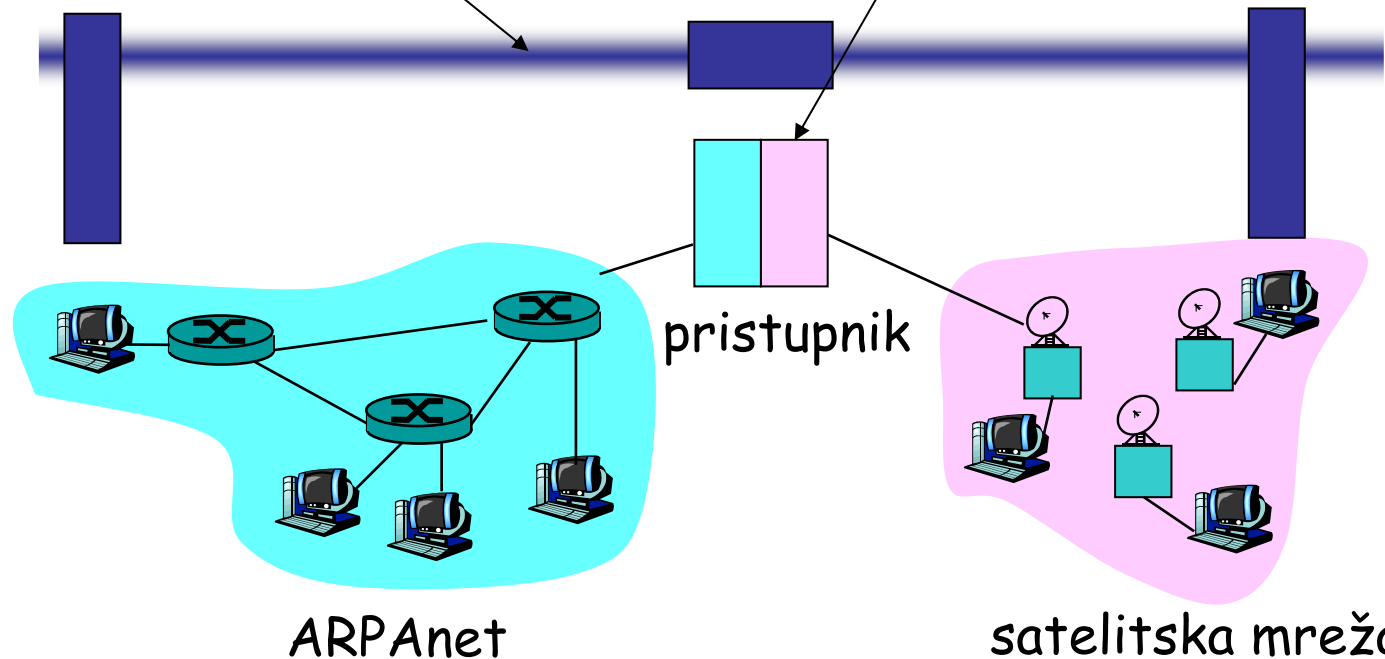
## Internet – virtualizirana mreža

Internetnetwork (međumrežje) sloj (IP):

- adresiranje: međumrežje se pojavljuje kao pojedinačan, uniformni entitet, uprkos heterogenosti lokalne mreže,
- mreža mreža.

Pristupnik (gateway):

- “ugrađeni međumrežni paketi u lokalni paketni format”
- rutiranje (na međumrežnoj razini) do slijedećeg pristupnika.



# Virtualizacija mreža

## Internet – virtualizirana mreža

Šta je virtualizacija?

- dva sloja adresiranja: međumrežni i lokalna mreža
  - novi sloj (IP) čini homogenim sve na međumrežnom sloju
  - tehnologija temeljne lokalne mreže:
    - kabel
    - satelit
    - 56K modem
    - danas: ATM, MPLS
- ... “nevidljivost” na međumrežnom sloju. Izgleda kao tehnologija podatkovnog sloja na IP-u!

## 7.5.6. ATM i MPLS

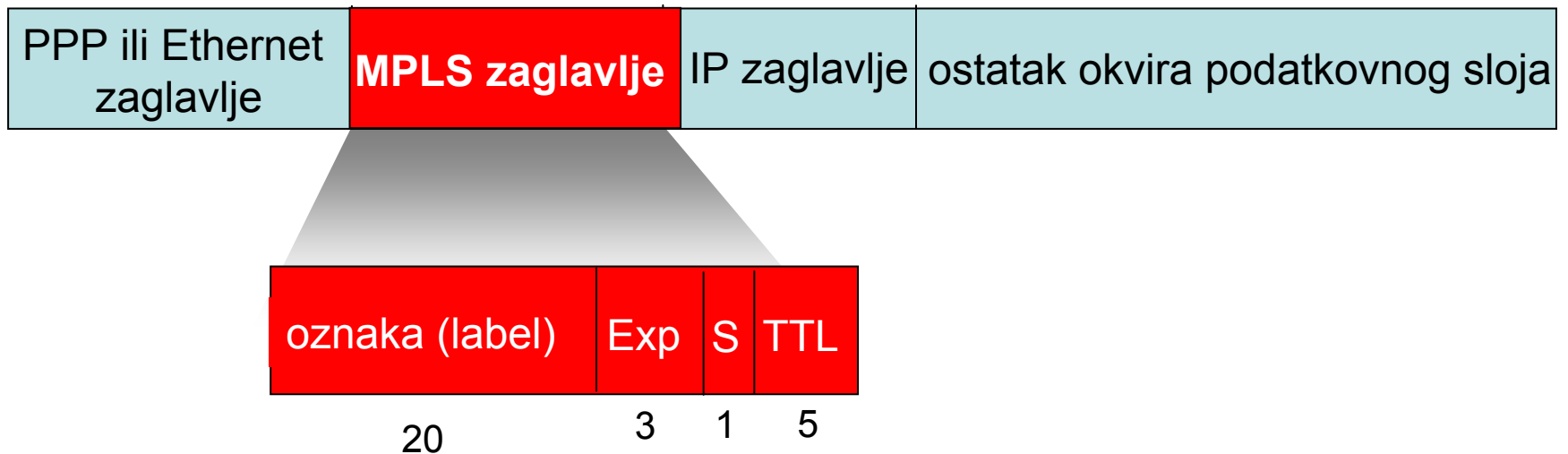
### Usporedba

- ATM i MPLS su separirane mreže
  - različiti modeli usluga, adresiranja, rutiranja iz Interneta.
- Sa tačke pogleda Interneta izgledaju kao logičkim vezama povezani IP usmjerivači
  - kao što je dialup veza stvarni dio separirane mreže (telefonska mreža).
- ATM, MPLS: tehnički interesantne u svojoj strukturi.

# MPLS

## MPLS (Multi-Protocol Label Switching)

- Početni cilj: ubrzati IP prosljeđivanje korištenjem fiksne duljine oznake (umjesto IP adrese)
  - ideja preuzeta iz VC (Virtual Circuit) pristupa
  - ali IP datagram i dalje zadržava IP adresu!





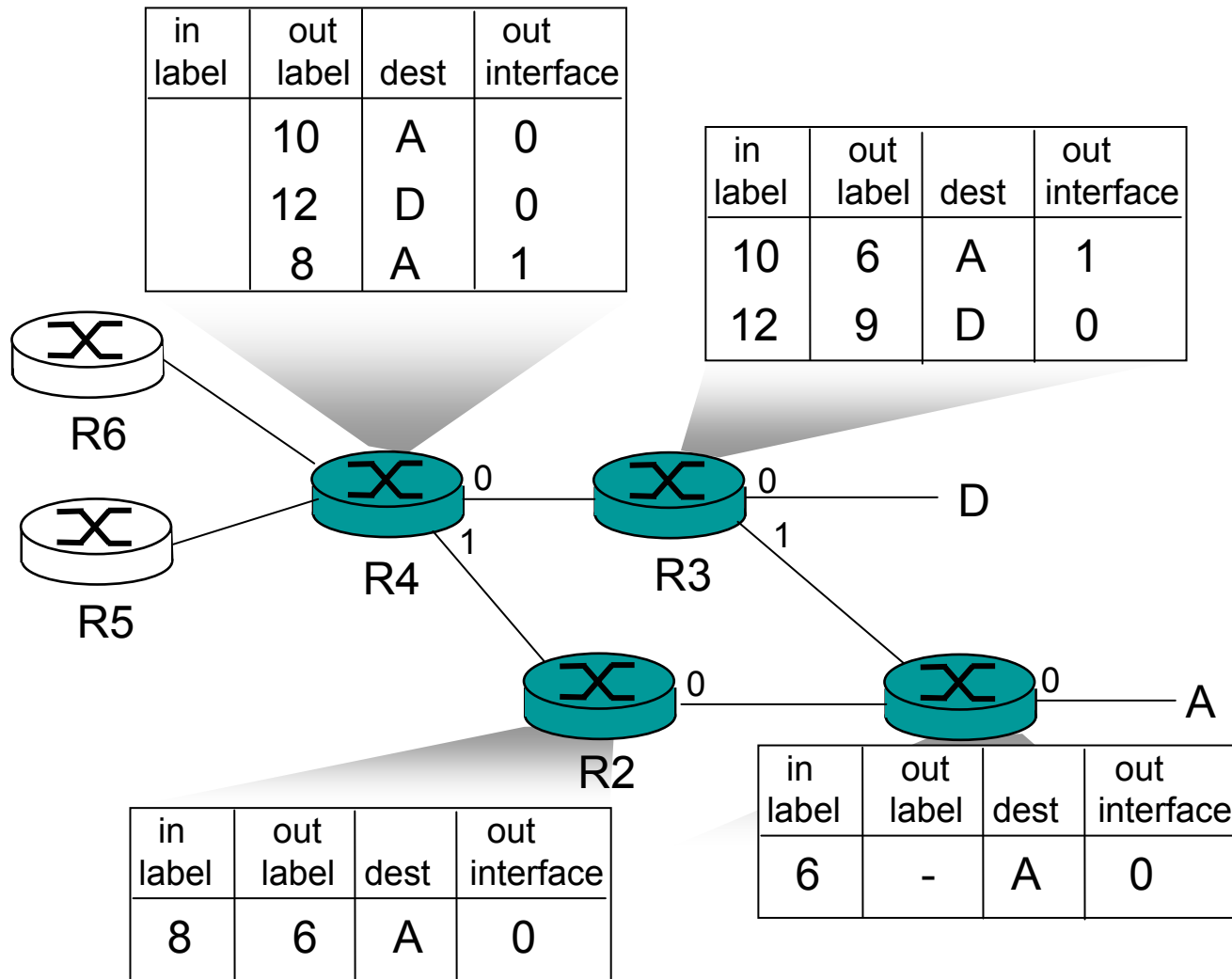
# MPLS

## MPLS usmjerivači

- Label-switched usmjerivač.
- Prosljeđuje pakete prema otvorenim sučeljima na temelju odgovarajućih vrijednosti oznaka (labela) (ne ispituje se IP adresa).
  - MPLS tabela prosljeđivanja razlikuje se od IP tabele.
- Potreban signalni protokol za postavljanje prosljeđivanja
  - RSVP-TE
  - Prosljeđivanje moguće duž staza koje nisu dostupne IP (npr. source-specific rutiranje) !!
  - koristi MPLS za upravljanje prometom.
- Mora koegzistirati sa IP usmjerivačima.

# MPLS

## MPLS tabela prosljeđivanja



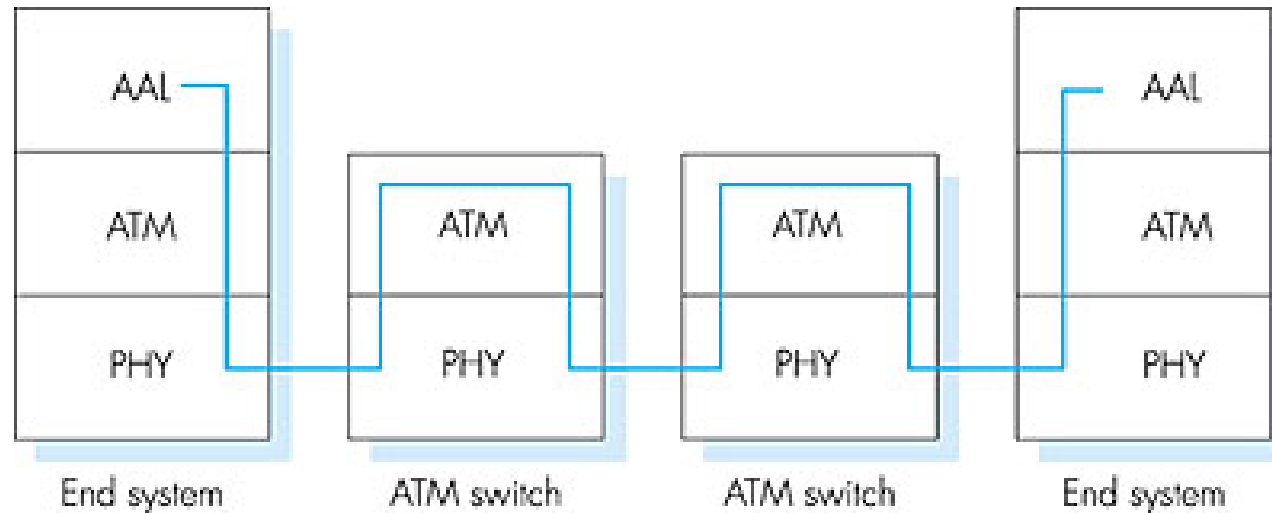
# ATM

## ATM (Asynchronous Transfer Mode)

- **1990-tih/2000-tih standard za veoma brze** (155Mbps do 622 Mbps i više) *Broadband ISDN (Integrated Service Digital Network)* arhitekture.
- **Cilj: integracija zvučnih, video i podatkovnih zapisa**
  - vremenski/QoS zahtjevi za zvuk, video (nasuprot Internet modelu)
  - “slijedeća generacija” telefonije
  - packet-switching (fiksna duljina paketa, nazvanih “ćelije”) koriste virtualne krugove.

# ATM

## ATM arhitektura



- **adaptacijski sloj:** predstavlja sami rub ATM mreže
  - segmentacija/ponovno skupljanje podataka
  - gruba analogija sa Internet transportnim slojem
- **ATM sloj:** “mrežni” sloj
  - preklapanje ćelija, usmjerivanje
- **fizički sloj**

# ATM

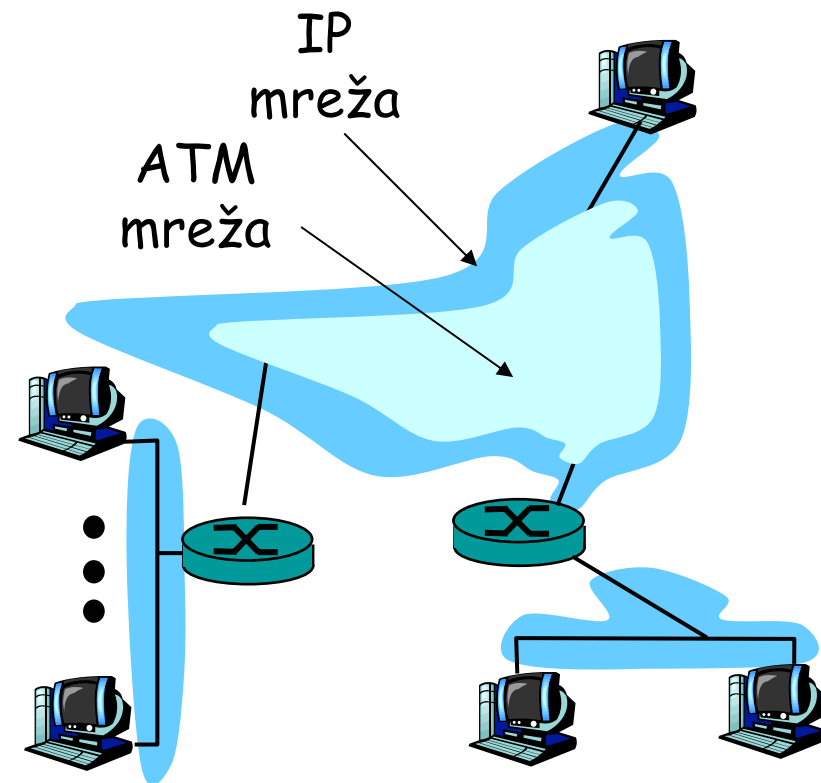
## ATM – mreža ili sloj?

### Vizija:

- Transport sa kraja-na-kraj: “ATM sa desktopa na desktop”
- ATM je mrežna tehnologija

### Realnost:

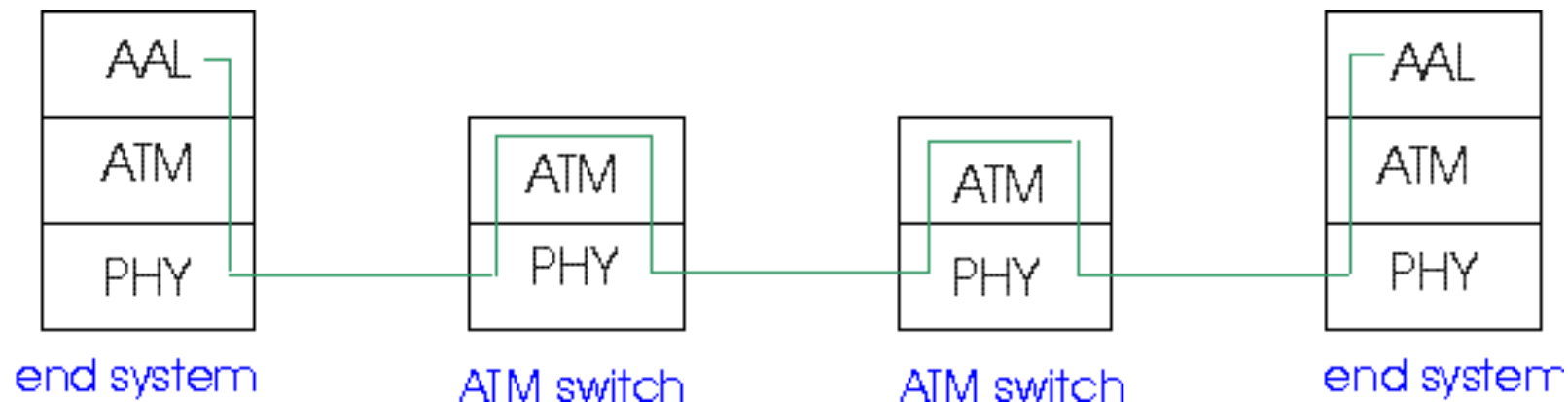
- Koristi se za povezivanje IP backbone usmjerivača
- “IP preko ATM”
- ATM kao preklopnik podatkovnog sloja, povezujući IP usmjerivače.



# ATM

## ATM adaptacijski sloj

- **ATM Adaptation Layer (AAL):** “adaptira” gornje slojeve (IP ili izvorne ATM aplikacije) na ATM sloj ispod.
- AAL prisutan **samo u krajnjim sistemima**, ne u preklopnicima.
- AAL segment sloja (zaglavlje/dodatna polja, podaci) fragmentiran kroz više ATM ćelija.
- Analogija: TCP segment u mnogim IP paketima.

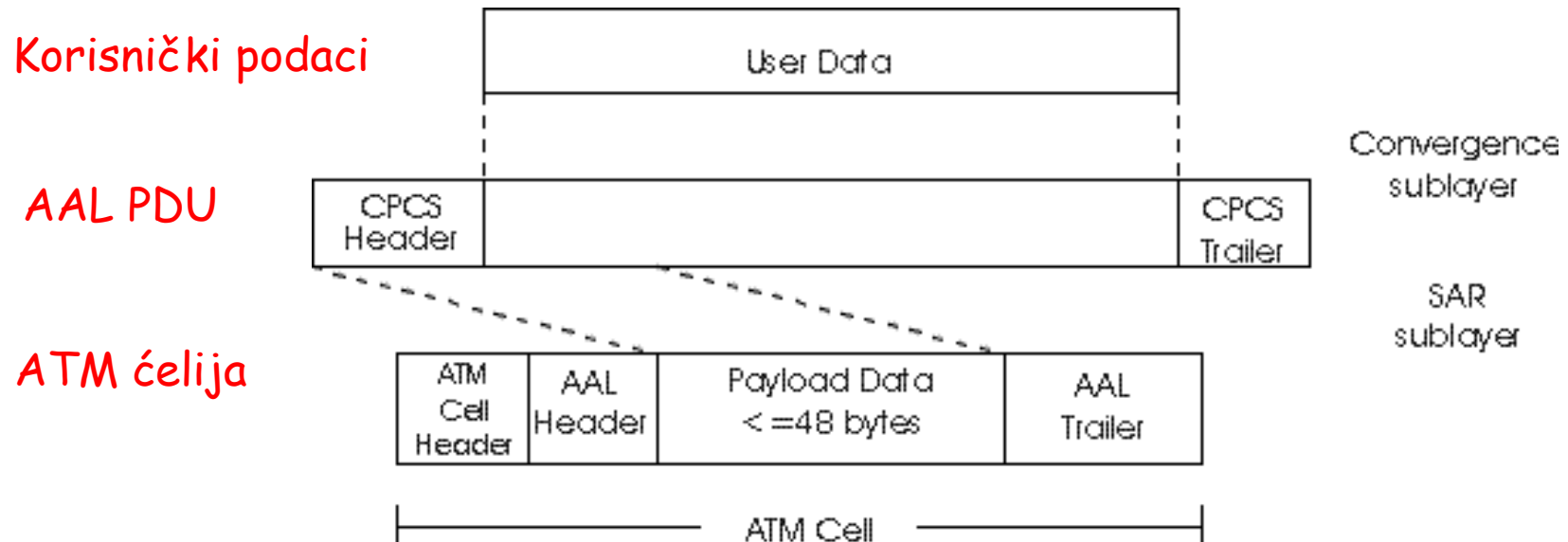


# ATM

## ATM adaptacijski sloj

Različite verzije AAL slojeva, ovisno o ATM klasi usluga:

- **AAL1:** za CBR (Constant Bit Rate) usluge, npr. emulacija kruga.
- **AAL2:** za VBR (Variable Bit Rate) usluge, npr. MPEG video.
- **AAL5:** za podatke, npr. IP datagrami.



# ATM

## ATM sloj

**Usluga:** transport ćelija kroz ATM mrežu

- Analogno sa IP mrežnim slojem.
- Veoma različite usluge u odnosu na IP mrežni sloj.

Network Architecture	Service Model	Guarantees ?			Congestion feedback	
		Bandwidth	Loss	Order Timing		
Internet	best effort	none	no	no	no	no (inferred via loss)
ATM	CBR	constant rate	yes	yes	yes	no congestion
ATM	VBR	guaranteed rate	yes	yes	yes	no congestion
ATM	ABR	guaranteed minimum	no	yes	no	yes
ATM	UBR	none	no	yes	no	no



# ATM

## ATM sloj – virtualni krugovi

- **VC transport:** ćelije prolaze kroz VC od izvora do cilja.
  - postavljanje ćelije, “porušiti” svaku ćeliju prije nego počne protok podataka
  - svaki paket nosi VC identifikator (ne ciljni (destination) ID)
  - *svaki* preklopnik na izvor-cilj stazi održava “stanje” za svaku konekciju prolaza
  - veza, resursi preklopnika (propusni opseg, spremnici (buffers)) mogu biti dodijeljeni VC-u.
- **Permanenti VC-ovi (PVC-ovi)**
  - duge trajne konekcije
  - tipično: “permanentno” usmjerivanje između IP usmjerivača.
- **Preklapanje VC-ova (SVC):**
  - Dinamičko postavljanje na “po pozivu” osnovi.