

1

## **Lo strato di collegamento Parte 2**

2

## **Protocolli di accesso multiplo Medium Access Control (MAC)**

3

## Protocolli di accesso multiplo

- Esistono due tipi di collegamenti di rete:
- **Collegamento punto-punto (PPP)**
  - Impiegato in connessioni telefoniche
  - Collegamenti punto-punto tra Ethernet e host
- **Collegamento broadcast (cavo o canale condiviso)**
  - Ethernet
  - Wireless LAN 802.11



canale cablato  
condiviso



RF condivisa  
(es. 802.11 WiFi)



RF condivisa  
(satellite)



persone a un  
cocktail party  
(rumore, aria condivisi)

4

## Protocolli di accesso multiplo

- **Centinaia o anche migliaia di nodi possono comunicare direttamente su un canale broadcast**
  - Si genera una collisione quando i nodi ricevono due o più frame contemporaneamente.
- **Protocolli di accesso multiplo**
  - Protocolli che fissano le modalità con cui i nodi regolano le loro trasmissioni sul canale condiviso
  - La comunicazione relativa al canale condiviso deve utilizzare lo stesso canale
    - non c'è un canale "out-of-band" per la coordinazione

5

## Protocollo di accesso multiplo ideale

- **Se il protocollo opera su un canale broadcast di capacità di  $R$  bit/s**
  - Quando un nodo deve inviare dati, questo dispone di un banda uguale a  $R$  bit/s
  - Quando  $M$  nodi devono inviare dati, questi dispongono di un banda uguale a  $R/M$  bit/s
  - Il protocollo è decentralizzato
    - non ci sono nodi master
    - non c'è sincronizzazione dei clock
  - Il protocollo è semplice

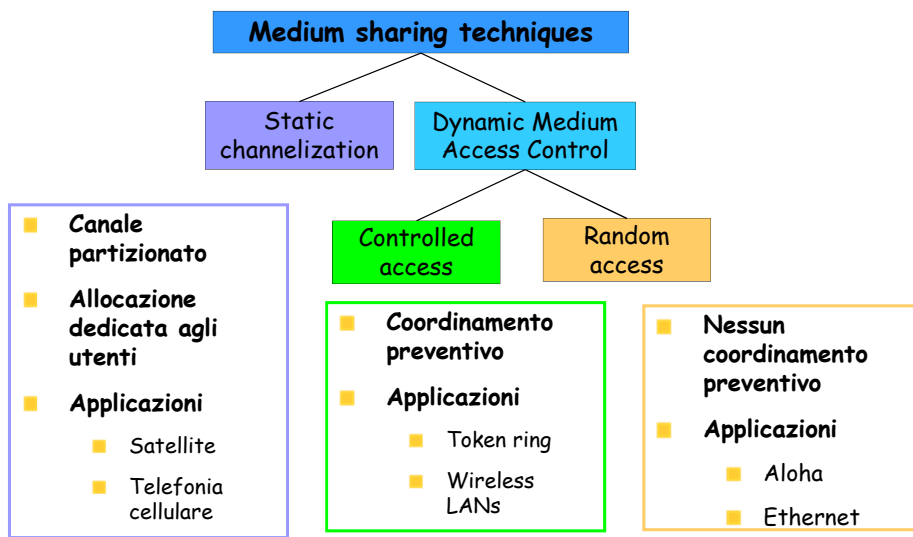
6

## Protocolli di accesso multiplo

- **Protocolli a suddivisione del canale (canalizzazione statica)**
  - Suddivide del canale in "parti più piccole" (slot di tempo, frequenza, codice)
  - le parti vengono allocate ad un nodo per utilizzo esclusivo
- **Protocolli ad accesso dinamico**
  - Protocolli ad accesso casuale (random access)
    - I canali non vengono divisi e si può verificare una collisione
    - I nodi coinvolti ritrasmettono ripetutamente i pacchetti
  - Protocolli ad accesso controllato (controlled access)
    - Ciascun nodo ha il suo turno di trasmissione, ma i nodi che hanno molto da trasmettere possono avere turni più lunghi.

7

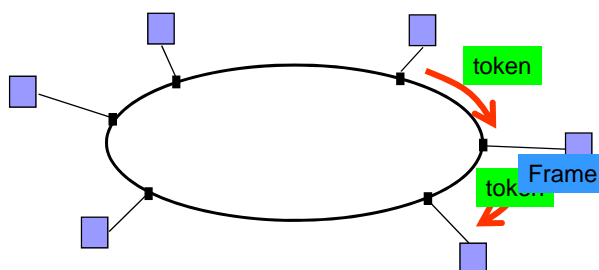
## Protocolli di accesso multiplo



8

## Protocollo ad accesso controllato Token-Passing

### Rete ad anello

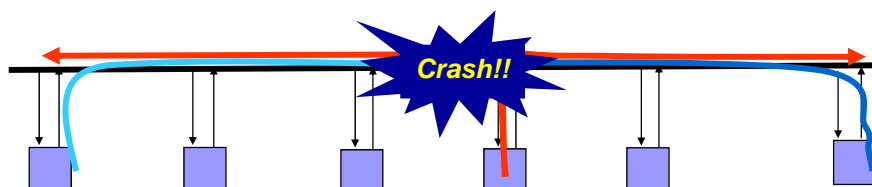


- La stazione che detiene il token può trasmettere
- Non sono possibili collisioni

9

## Random Access

Rete a bus

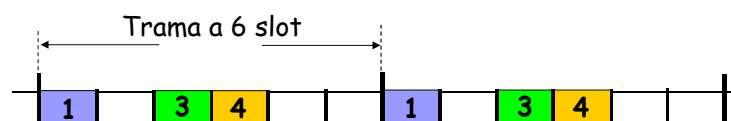


- Una stazione trasmette quando è pronta
- Possibili collisioni, strategie di ritrasmissione

10

## Protocolli a suddivisione del canale TDMA

- **TDMA: accesso multiplo a divisione di tempo.**
  - Turni per accedere al canale
  - Suddivide il canale condiviso in intervalli di tempo
  - Gli slot non usati rimangono inattivi
  - Esempio: negli slot 1, 3 e 4 è trasmesso un pacchetto; gli slot 2, 5 e 6 sono inattivi

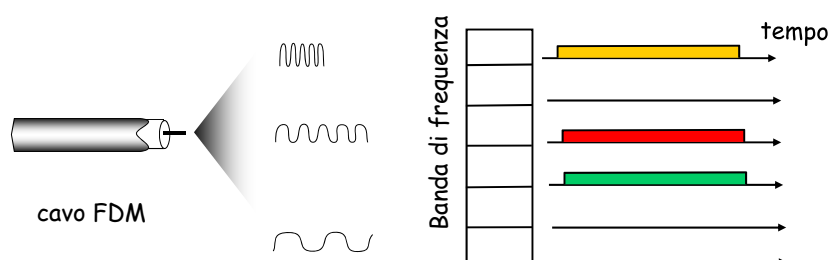


## Protocolli a suddivisione del canale FDMA

11

### ■ FDMA: accesso multiplo a divisione di frequenza

- Suddivide il canale in bande di frequenza
- A ciascuna stazione è assegnata una banda di frequenza prefissata
- Esempio: le bande 1, 3 e 4 sono utilizzate in trasmissione; le bande 2, 5 e 6 sono inattive



## Protocolli ad accesso casuale

12

- Quando un nodo deve inviare un pacchetto
  - trasmette sempre alla massima velocità del canale, cioè  $R$  bit/s
  - nessun coordinamento a priori tra i nodi
- Se due o più nodi trasmettono "contemporaneamente" si ha una "collisione"
- Un protocollo ad accesso casuale definisce
  - Come rilevare un'eventuale collisione
  - Le politiche di ritrasmissione in caso di collisione
- Esempi di protocolli ad accesso casuale
  - slotted ALOHA
  - ALOHA
  - CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA

13

## Prodotto Banda-Ritardo

### ■ Prodotto banda ritardo

$$\text{PBR} = R \cdot d \text{ (bit)}$$

- $R$  (bit/s): banda del canale
- $d$  (sec): ritardo di propagazione end-to-end

### ■ E' il numero di bit che si trovano contemporaneamente sul canale

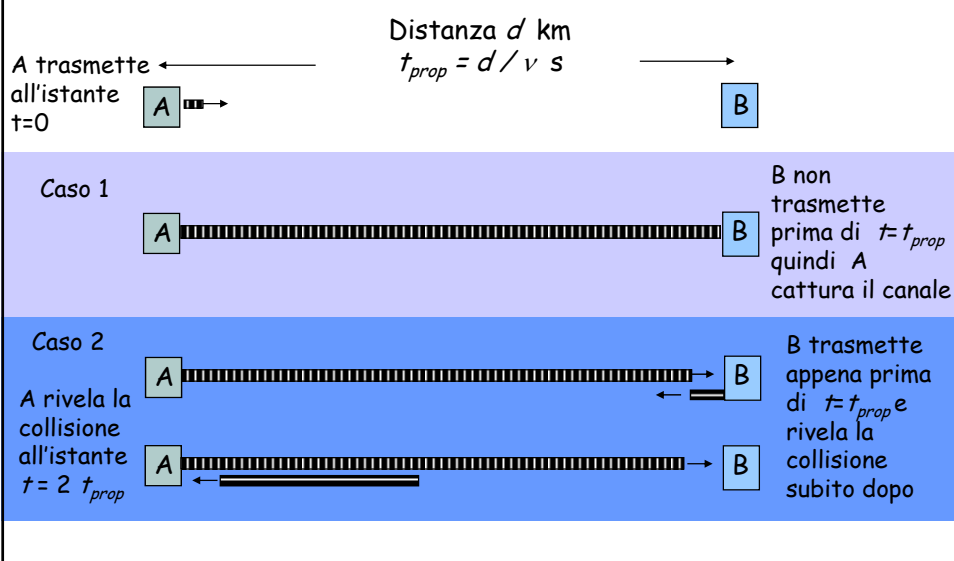
- lunghezza elettrica del canale

### ■ Parametro chiave dei protocolli MAC

- Il coordinamento tra i nodi richiede l'uso della banda del canale (in modo esplicito o implicito)
- La difficoltà del coordinamento è legata al prodotto banda-ritardo

14

## Esempio MAC con due nodi



15

## Calcolo dell'efficienza

- La trasmissione di una frame ha un **intervallo di vulnerabilità** uguale a  $2t_{prop}$

- Il nodo B non deve iniziare la trasmissione un tempo  $t_{prop}$  prima e dopo rispetto all'inizio della trasmissione di A

- $R$  bit rate del canale (bit/s)

- $L$  lunghezza di una frame (bit)

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

$$\text{Throughput Massimo} = R_{\text{eff}} = \frac{L}{L/R + 2t_{prop}} = \frac{1}{1 + 2a} R \text{ bit/s}$$

Prodotto banda  
ritardo normalizzato

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

← Ritardo di Propagazione  
← Tempo di trasmissione di una frame

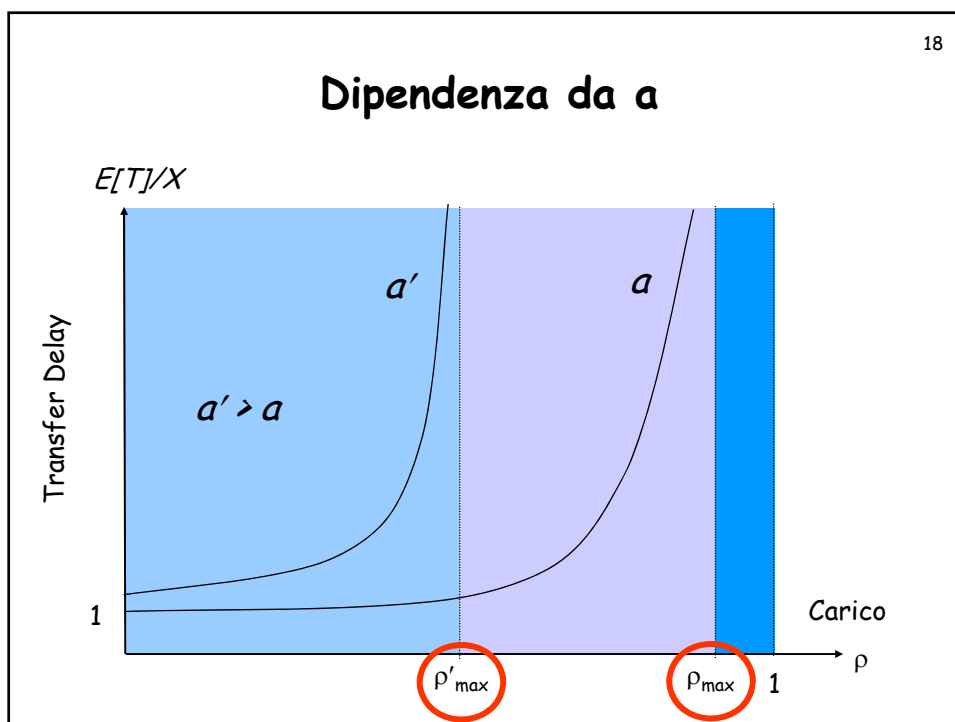
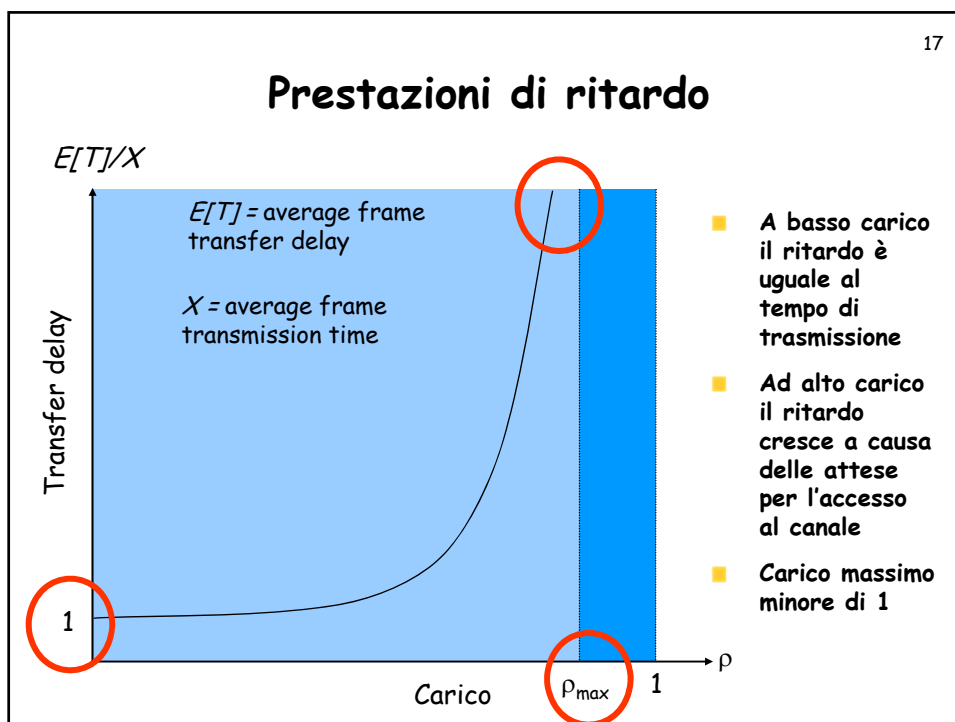
16

## Valori tipici del prodotto banda-ritardo

Distanza	10 Mbit/s	100 Mbit/s	1 Gbit/s	Tipo di rete
1 m	$5 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-1}$	$5 \times 10$	Desk area network (DAN)
100 m	$5 \times 10^1$	$5 \times 10^2$	$5 \times 10^3$	Local area network (LAN)
10 km	$5 \times 10^2$	$5 \times 10^3$	$5 \times 10^4$	Metropolitan area network (MAN)
1000 km	$5 \times 10^4$	$5 \times 10^5$	$5 \times 10^6$	Wide area network (WAN)
100000 km	$5 \times 10^6$	$5 \times 10^7$	$5 \times 10^8$	Global area network

- Max size Ethernet frame = 1500 byte = 12000 bit =  $1.2 \times 10^4$  bit
- Se aumenta il prodotto banda-ritardo l'efficienza di un protocollo MAC diminuisce

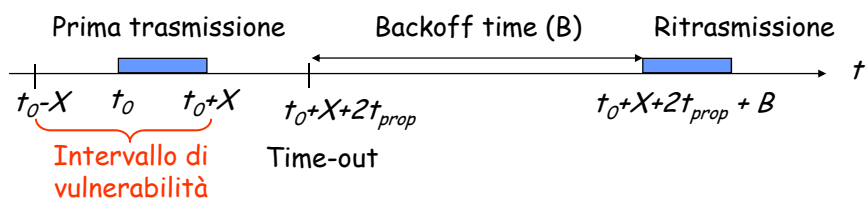




19

## Protocollo ALOHA

- Protocollo sviluppato per l'interconnessione tra dipartimenti dell'Università delle Hawaii
  - Un nodo trasmette appena ha una frame pronta
  - Se viene trasmessa più di una frame si ha una collisione (frame persa)
  - Se un nodo non riceve un ACK entro un certo tempo (timeout), il nodo calcola il tempo di ritrasmissione (backoff time)
  - Il nodo ritrasmette allo scadere del backoff time



20

## Modello prestazionale Aloha

- **Definizioni**
  - $X$ : frame transmission time (costante)
  - $S$ : throughput (numero medio di frame trasmesse con successo in un intervallo di  $X$  secondi) ( $0 < S < 1$ )
  - $G$ : load (numero medio di tentativi di trasmissione in un intervallo di  $X$  secondi)
  - $P_{succ}$ : probabilità che una trama sia trasmessa con successo

- **Si ha**

$$S = G \cdot P_{success}$$

21

## Modello prestazionale Aloha

- L'intervallo di vulnerabilità nella trasmissione di una frame è uguale a  $2X$
- Si consideri che il carico  $G$  comprenda anche le trasmissioni
  - Dividiamo  $X$  in  $n$  intervalli di durata  $\Delta = X/n$
  - se  $p$  è la probabilità di una trasmissione in un intervallo  $\Delta$  si ha

$$G = n p$$

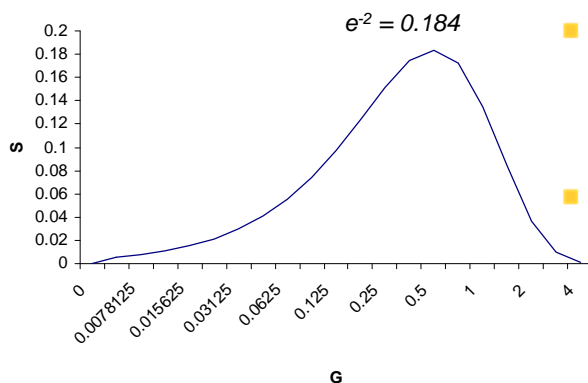
$$\begin{aligned}
 P_{succ} &= \\
 &= P[0 \text{ arrivi in } 2X] = \\
 &= P[0 \text{ arrivi in } 2n \Delta] = \\
 &= (1 - p)^{2n} = \left(1 - \frac{G}{n}\right)^{2n} \\
 &\text{per } n \rightarrow \infty
 \end{aligned}$$

$$P_{succ} = e^{-2G}$$

22

## Throughput Aloha

$$S = G P_{success} = G e^{-2G}$$



- Max throughput  $p_{max} = 1/2e$  (18.4%)
- Comportamento bimodale
  - per valori bassi di  $G$ ,  $S \approx G$
  - per valori elevati di  $G$ ,  $S \downarrow 0$
- Le collisioni sono in numero elevato il throughput tende a zero
- instabilità

23

## Slotted ALOHA

### Ipotesi

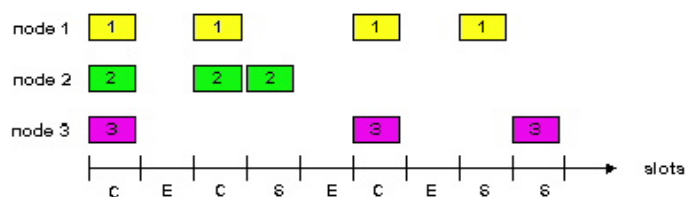
- Tutti i pacchetti hanno la stessa dimensione
- Il tempo è suddiviso in slot; ogni slot equivale al tempo di trasmissione di un pacchetto
- I nodi iniziano la trasmissione dei pacchetti solo all'inizio degli slot.
- I nodi sono sincronizzati
- Se in uno slot due o più pacchetti collidono, i nodi coinvolti rilevano l'evento prima del termine dello slot

### Operazioni

- Quando a un nodo arriva un nuovo pacchetto da spedire, il nodo attende fino all'inizio dello slot successivo.
  - Se non si verifica una collisione: il nodo può trasmettere un nuovo pacchetto nello slot successivo
  - Se si verifica una collisione: il nodo la rileva prima della fine dello slot e ritrasmette con probabilità  $p$  il suo pacchetto durante gli slot successivi

24

## Slotted ALOHA



### Pro

- Consente a un singolo nodo di trasmettere continuamente pacchetti alla massima velocità del canale
- È fortemente decentralizzato, ciascun nodo rileva le collisioni e decide indipendentemente quando ritrasmettere.
- È estremamente semplice

### Contro

- Una certa frazione degli slot presenterà collisioni e di conseguenza andrà "sprecata"
- Un'alta frazione degli slot rimane vuota, quindi inattiva

25

## L'efficienza dello Slotted Aloha

L'**efficienza** è definita come la frazione di slot in cui avviene una trasmissione utile in presenza di un elevato numero di nodi attivi, che hanno sempre un elevato numero pacchetti da spedire.

- Supponiamo  $N$  nodi con pacchetti da spedire, ognuno trasmette i pacchetti in uno slot con probabilità  $p$
- La probabilità di successo di un dato nodo =  $p(1-p)^{N-1}$
- La probabilità che un nodo arbitrario abbia successo =  $Np(1-p)^{N-1}$

- Per ottenere la massima efficienza con  $N$  nodi attivi, bisogna trovare il valore  $p^*$  che massimizza  $Np(1-p)^{N-1} \rightarrow p^* = 1/N$

- Per un elevato numero di nodi, ricaviamo che

$$\lim_{N \rightarrow \infty} Np^* (1-p^*)^{N-1} =$$

$$= \lim_{N \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{N}\right)^N = \frac{1}{e} = 0,36$$

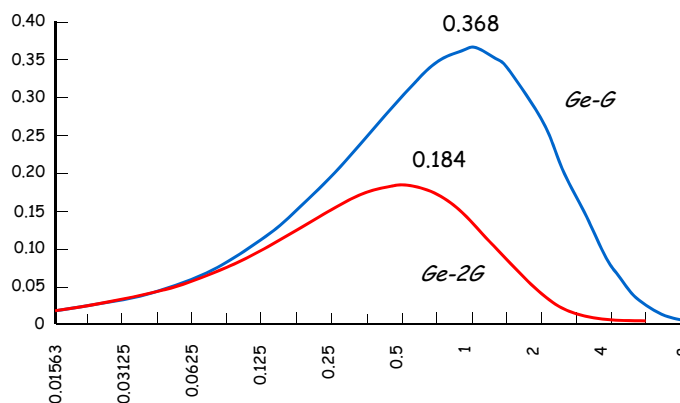
*Nel caso migliore:* solo il 36% degli slot sono utilizzati in modo utile

26

## Throughput Aloha

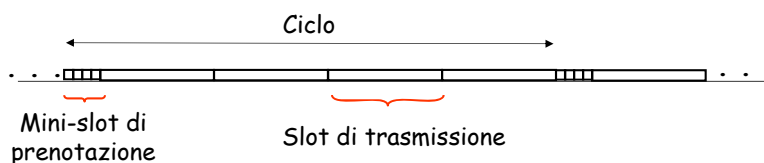
$$S = GP_{\text{success}} = GP[0 \text{ arrivi in } X] = GP[0 \text{ arrivi in } n\Delta] =$$

$$= G(1-p)^n = G\left(1 - \frac{G}{n}\right)^n \rightarrow Ge^{-G}$$



27

## Applicazioni slotted Aloha



- Alcuni protocolli permettono la prenotazione di slot per effettuare la trasmissione delle frame
- L'asse dei tempi è suddiviso in cicli
- Ogni ciclo ha una serie di mini-slot per effettuare le prenotazioni
- I nodi usano il protocollo slotted Aloha nei mini-slot per effettuare le prenotazioni

28

## Accesso multiplo a rilevazione della portante (CSMA)

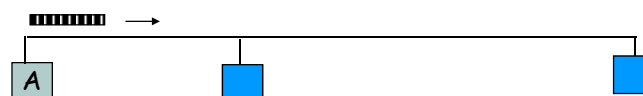
- **Carrier Sensing Multiple Access**
  - Un nodo ascolta prima di trasmettere
  - Se rileva che il canale è libero, trasmette l'intera frame
  - Se il canale è occupato, il nodo aspetta un altro intervallo di tempo
- **Analogia:** se qualcun altro sta parlando, aspettate finché abbia concluso

29

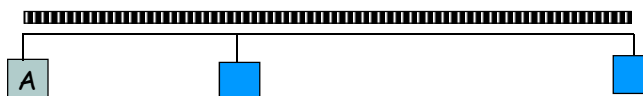
## CSMA

- **Un nodo ascolta il canale prima di trasmettere**
  - Se il canale è occupato, attende o applica il backoff (varie opzioni)
  - Se il canale è libero, inizia la trasmissione
  - **Intervallo di vulnerabilità è uguale a  $2t_{prop}$**  (effetto di cattura del canale)
  - Se avviene una collisione, questa interessa l'intera frame
  - se  $\alpha > 1$ , nessun guadagno rispetto ai protocolli ALOHA or slotted ALOHA

Il nodo A inizia  
a trasmettere a  
 $t = 0$



Il nodo A cattura  
il canale al tempo  
 $t = t_{prop}$



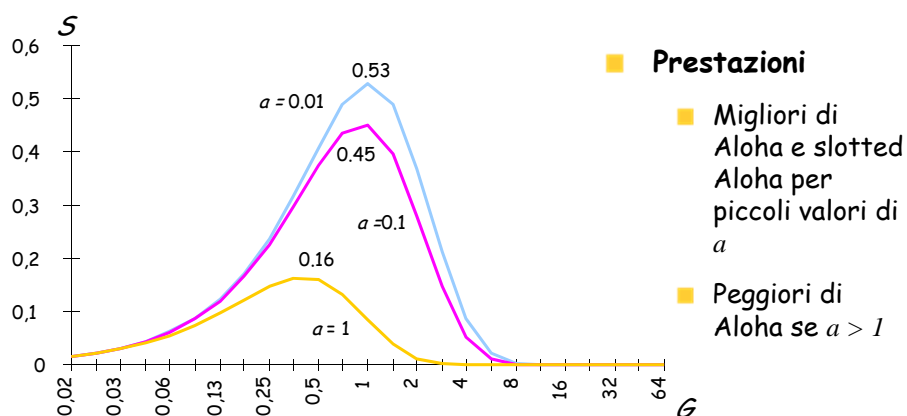
30

## Algoritmi di persistenza

- **Si applicano quando un nodo rivela il canale occupato**
  - **1-persistent CSMA**
    - Il nodo inizia la trasmissione non appena il canale si libera
    - Basso ritardo e bassa efficienza
  - **Non-persistent CSMA**
    - Il nodo applica un backoff, quindi effettua un nuovo carrier sensing
    - Alto ritardo e alta efficienza
  - **p-persistent CSMA**
    - Il nodo attende fino a che Wait il canale si libera, quindi
      - con probabilità  $p$  trasmette
      - con probabilità  $1-p$  attende un breve periodo (mini-slot) ed effettua nuovamente il carrier sensing
    - Il ritardo e l'efficienza possono essere modulati

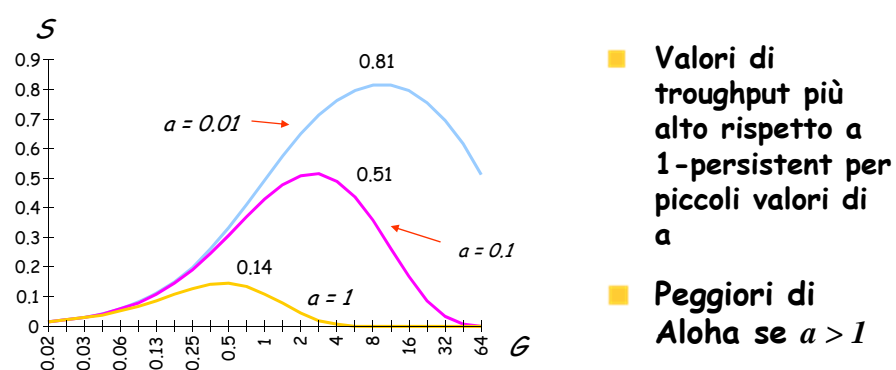
31

## Prestazioni 1-persistent CSMA



32

## Prestazioni non-persistent CSMA





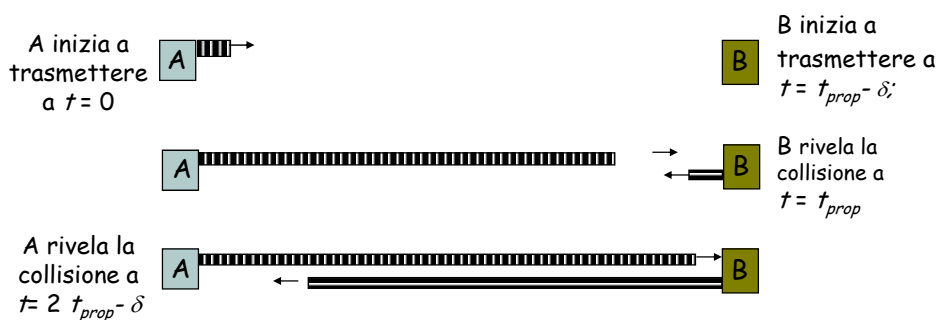
33

## CSMA with Collision Detection (CSMA/CD)

- **"Ascolta prima di parlare e mentre parli"**
  - Rivela le collisioni ed interrompe la trasmissione
  - Un nodo ascolta il canale prima di trasmettere
  - Dopo l'inizio della trasmissione il nodo continua ad ascoltare il canale per rivelare le collisioni
  - Se viene rivelata una collisione, tutti i nodi coinvolti interrompono la trasmissione e rischedulano dopo un intervallo di backoff
- Nel protocollo CSMA, una collisione comporta un periodo di inutilizzazione del canale uguale a al tempo di trasmissione di una frame
- Il protocollo CSMA-CD riduce le durate delle collisioni e quindi aumenta l'efficienza

34

## Rivelazione di una collisione



- Nel caso peggiore i nodi coinvolti nella collisione le rivelano dopo un tempo  $t = 2t_{prop}$ 
  - Minore del tempo di trasmissione di una frame

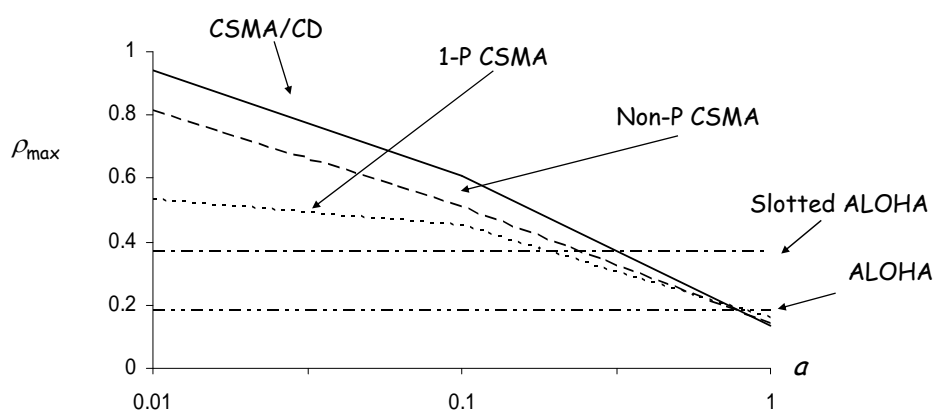
35

## Ethernet

- Lo standard LAN Ethernet LAN è basato sul CSMA-CD
  - 1-persistent CSMA
  - $R = 10 \text{ Mbit/s}$
  - $t_{\text{prop}} = 51.2 \mu\text{s}$ 
    - 512 bit = 64 byte slot
    - distanza massima 2.5 km + 4 repeaters
  - Truncated Binary Exponential Backoff
    - Dopo l'n-ma collisione, il tempo di backoff è scelto tra i valori  $\{0, 1, \dots, 2^k - 1\}$ , dove  $k = \min(n, 10)$

36

## Confronto MAC random access



- For piccoli valori di  $a$ : CSMA-CD ha il throughput migliore
- For grandi valori di  $a$ : le prestazioni migliori sono di Aloha & slotted Aloha

37

## Protocolli MAC ad accesso controllato

### ■ Protocolli MAC a suddivisione del canale

- Condividono il canale equamente ed efficientemente con carichi elevati
- Inefficienti con carichi non elevati

### ■ Protocolli MAC ad accesso casuale

- Efficienti con carichi non elevati: un singolo nodo può utilizzare interamente il canale
- Carichi elevati: eccesso di collisioni

### ■ Protocolli ad accesso controllato

- Prendono il meglio dei due protocolli precedenti

38

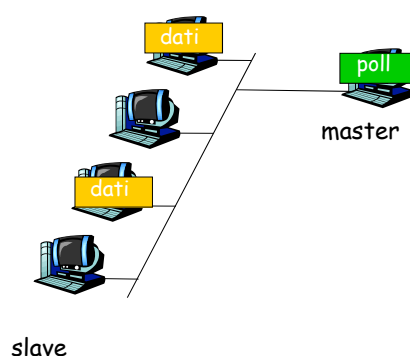
## Protocolli ad accesso controllato

### ■ Protocollo polling

- Un nodo principale sonda "a turno" gli altri.

#### ■ In particolare:

- elimina le collisioni
- elimina gli slot vuoti
- ritardo di polling
- se il nodo principale (master) si guasta, l'intero canale resta inattivo.

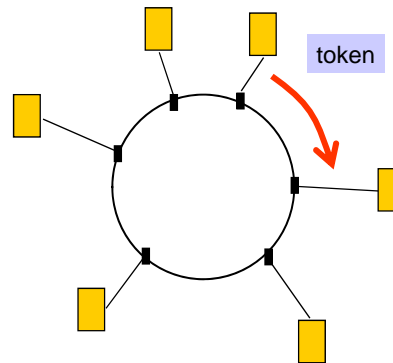


39

## Protocolli ad accesso controllato

### ■ Protocollo token-passing

- Un messaggio di controllo circola fra i nodi seguendo un ordine prefissato
- Messaggio di controllo (token)
- In particolare
  - decentralizzato
  - altamente efficiente
  - il guasto di un nodo può mettere fuori uso l'intero canale

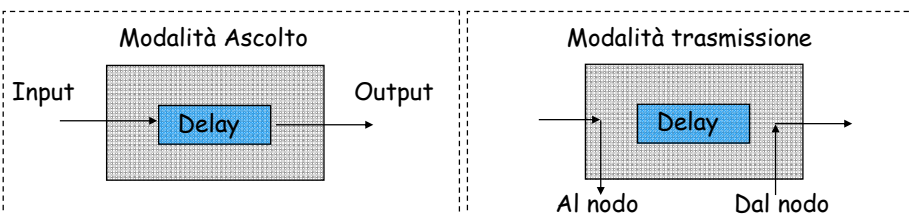


40

## Application: Token-Passing Rings

### ■ Il flag delle frame può essere il token

- Free token = 01111110
- Busy token = 01111111



I nodi che sono pronti a trasmettere aspettano il token e cambiano il bit finale del flag per convertire il token da free a busy

Il nodo che ha il token trasmette, al termine della trasmissione reinserisce il free token

41

## Metodi di reinserimento del token

### Ring latency

- numero di bit che possono essere trasmessi simultaneamente sul ring

### Multi-token operation

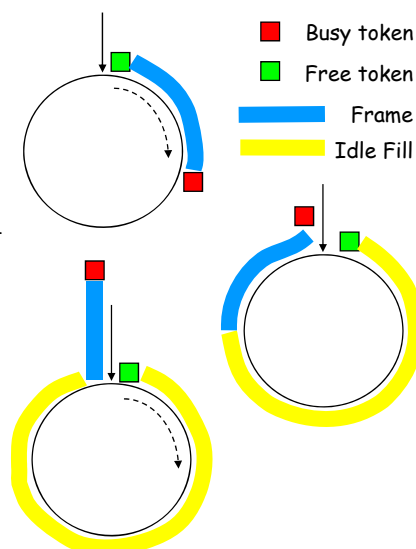
- Il Free token è trasmesso immediatamente dopo l'ultimo bit di una frame

### Single-token operation

- Il Free token è inserito dopo che l'ultimo bit del busy token è ritornato al nodo origine
- Il tempo di trasmissione uguale almeno alla ring latency
- Se la frame è maggiore della ring latency, è equivalente al multi-token operation

### Single-Frame operation

- Il Free token è inserito dopo che il nodo emittente ha ricevuto l'ultimo bit della sua frame
- E' equivalent ad aggiungere alla frame un trailer uguale alla ring latency



42

## Throughput del protocollo Token Ring

### Definizioni

- $\tau$ : tempo richiesto ad un bit per circolare nel ring
- $T$ : tempo di trasmissione di una frame

### Multi-token operation

- Assumiamo che la rete è caricata al massimo, tutti gli  $M$  nodi trasmettono una frame dopo aver ricevuto il token
- Equivale ad un protocollo di tipo polling con un tempo di servizio limitato a  $X$

$$\rho_{\max} = \frac{MT}{\tau + MT} = \frac{1}{1 + \tau / MT} = \frac{1}{1 + a / M}$$

$$a = \frac{\tau}{T} \quad \text{è la ring latency normalizzata}$$

43

## Throughput del protocollo Token Ring

### ■ Single-frame operation

- Il tempo di trasmissione di una frame è uguale al massimo tra  $T$  e  $\tau$

$$\rho_{\max} = \frac{MT}{\tau + M \max(T, \tau)} = \frac{1}{\frac{a}{M} + \max(1, a)}$$

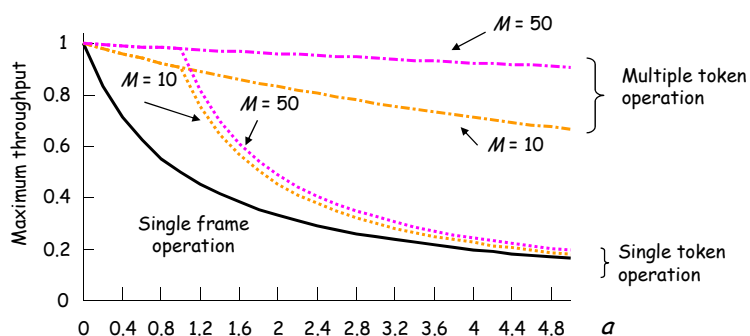
### ■ Single-token operation

- Il tempo di trasmissione di una frame è uguale a  $T + \tau$

$$\rho_{\max} = \frac{MT}{\tau + M(T + \tau)} = \frac{1}{1 + a(1 + \frac{1}{M})}$$

44

## Throughput del protocollo Token Ring



- Se  $a < 1$ : è accettabile qualsiasi strategia di reinserimento del token
- Se  $a \approx 1$ : è accettabile la modalità single token operation
- Se  $a > 1$ : è necessaria la modalità multitoken operation

## Protocolli MAC: riepilogo

- **Cosa si può fare con un canale condiviso ?**
  - Suddivisione del canale per: tempo, frequenza, codice.
    - TDM, FDM
  - Accesso casuale
    - ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD
    - Rilevamento della portante: facile in alcune tecnologie (cablate), difficile in altre (wireless)
    - CSMA/CD usato in Ethernet
    - CSMA/CA usato in 802.11
  - Ad accesso controllato
    - Polling con un nodo principale; a passaggio di token
    - Bluetooth, FDDI, IBM Token Ring