

Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

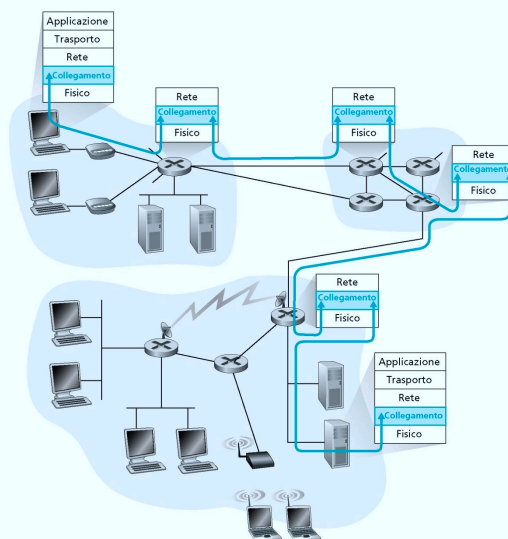


Corso di Reti di Calcolatori  
a.a. 2009/10

Roberto Canonico ([roberto.canonico@unina.it](mailto:roberto.canonico@unina.it))  
Antonio Pescapè ([pescapè@unina.it](mailto:pescapè@unina.it))

Lo strato di collegamento:  
Introduzione e concetti generali

## Il livello data link nella rete

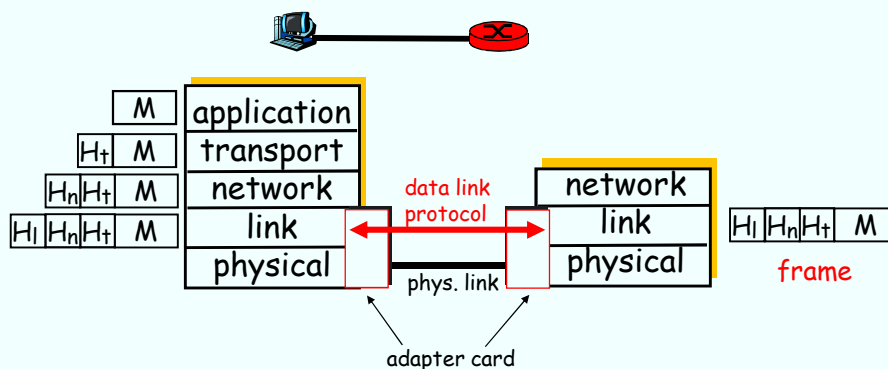


2

## Caratteristiche del livello data link



- Si occupa della comunicazione tra due dispositivi **fisicamente connessi**:
  - host-router, router-router, host-host
- Unità di dati: **frame**



3

## Servizi del livello data link (1/2)



- **Framing (incorniciatura) ed accesso al link:**
  - Incapsulamento di datagrammi all'interno di frame, aggiunta di campi di intestazione (header e trailer)
  - Gestione dell'accesso al canale, in caso di mezzo condiviso
  - Utilizzo di 'indirizzi fisici' all'interno delle frame, per identificare nodo sorgente e destinazione:
    - NB: indirizzi fisici diversi dagli indirizzi di rete!
- **Trasferimento affidabile dei dati tra due dispositivi fisicamente connessi:**
  - Utile soprattutto in caso di collegamenti con alta probabilità di errore, quali i link wireless
- **Controllo di flusso:**
  - Per regolare la velocità di trasmissione tra mittente e destinatario

4

## Servizi del livello data link (2/2)



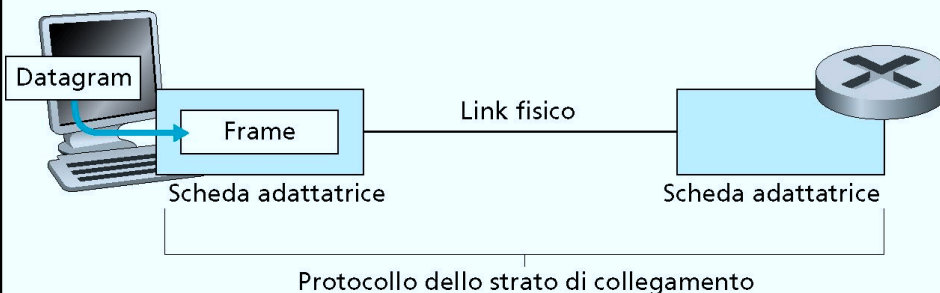
- **Rilevazione degli errori:**
  - Errori causati da attenuazione del segnale o da presenza di rumore (interferenza)
  - Il ricevente rileva la presenza di errori e:
    - Segnala tale evento al mittente...
    - ...oppure elimina la frame ricevuta
- **Correzione degli errori:**
  - Il ricevente identifica e *corregge* errori su alcuni bit della frame, evitando ritrasmissioni da parte del mittente
    - FEC, Forward error correction vs ARQ
- **Trasferimento dati di tipo half-duplex o full-duplex**

5

## Interfacce di rete



- Un adattatore è un circuito (es: scheda PCMCIA) che si occupa di:
  - Ricevere *datagram* dallo strato di rete
  - Incapsulare i datagram ricevuti all'interno di *frame*
  - Trasmettere le frame all'interno del link di comunicazione
  - In ricezione, effettuare le operazioni inverse...

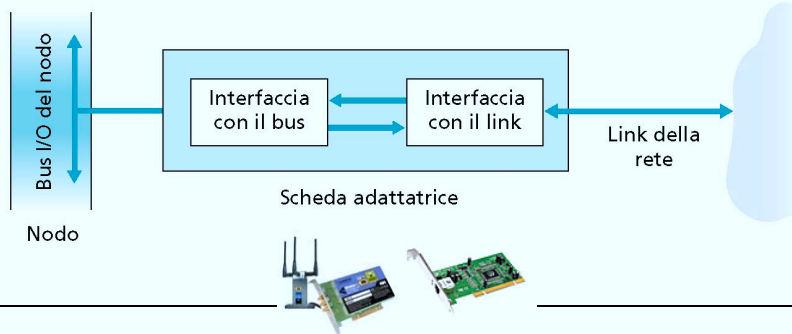


6

## Funzionamento degli adattatori di rete

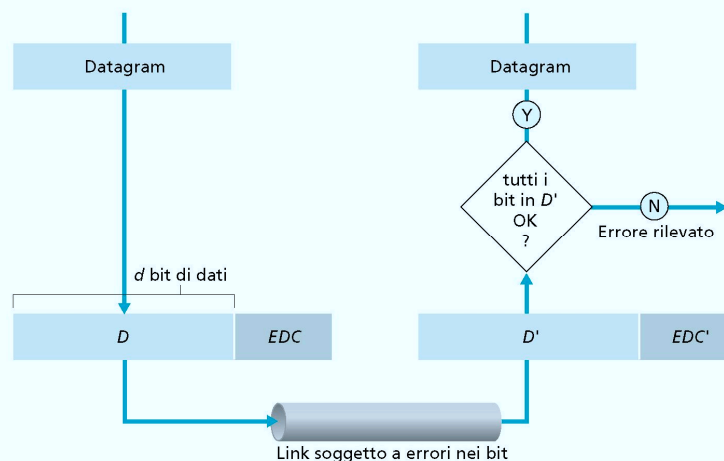


- Gli adattatori sono entità semi-autonome:
  - Alla ricezione di una frame, il nodo è coinvolto solo se i dati devono essere passati al livello rete
  - Un nodo che spedisce un datagram, delega completamente all'adattatore di rete la trasmissione sul link
- Un adattatore è, dunque, dotato di memoria RAM, di un DSP, di chip di elaborazione delle frame e di interfacce verso il bus dell'host e verso il link



7

## Rilevazione degli errori



EDC: Error Detection & Correction  
D: Dati

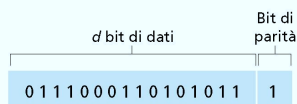
8

## Controllo di parità



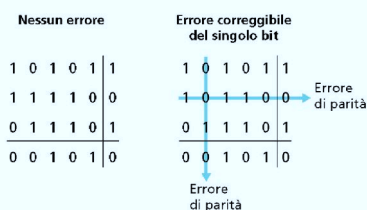
### Parità ad un bit:

Rilevazione errori su un singolo bit



### Parità a due bit:

Rilevazione e correzione di errori su un singolo bit  
Rilevazione di errori su due bit



9

## Metodi di checksum



**Obiettivo:** rilevare "errori" sui bit all'interno dei segmenti trasmessi (tecnica tipicamente utilizzata al livello trasporto)

### Mittente:

- Tratta il contenuto del segmento come una sequenza di interi espressi su 16 bit
- checksum: addizione (in complementi ad 1) del contenuto del segmento
- La checksum calcolata viene inserita all'interno di un apposito campo dell'header del segmento

### Ricevitore:

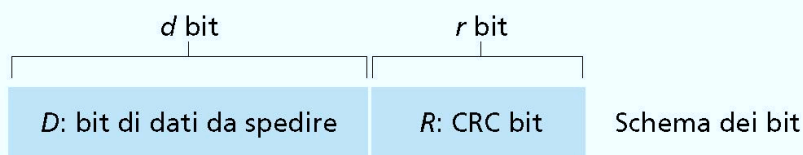
- Calcola il complemento ad 1 della somma dei dati ricevuti (compresa la checksum)
- Risultato composto da tutti bit pari ad 1?
  - NO: errore!
  - SI: nessun errore rilevato...
    - ...il che non vuol dire che non vi siano stati errori ☹

10

## Codici CRC -- Cyclic Redundancy Check



- Si considerano i bit di dati,  $D$ , come un numero binario
- Si sceglie un opportuno pattern di  $r+1$  bit (generatore),  $G$  (noto anche al ricevitore)
- Obiettivo: scegliere  $r$  bit di controllo CRC,  $R$ , tali che:
  - $\langle D, R \rangle$  sia divisibile esattamente per  $G$  (modulo 2)
  - Il ricevente divide  $\langle D, R \rangle$  per  $G$ :
    - Se il resto della divisione non è nullo:
      - errore rilevato!
- Con tale tecnica si possono rilevare tutti gli errori (a raffica) che coinvolgono meno di  $r+1$  bit
- Il CRC è molto utilizzato nella pratica, al livello data link



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

Formula matematica

11

## Un esempio di codice CRC



**Obiettivo, trovare  $R$  in modo tale che esista un  $n$ :**

$$D \cdot 2^r \text{ XOR } R = nG$$

**In maniera equivalente:**

$$D \cdot 2^r = nG \text{ XOR } R$$

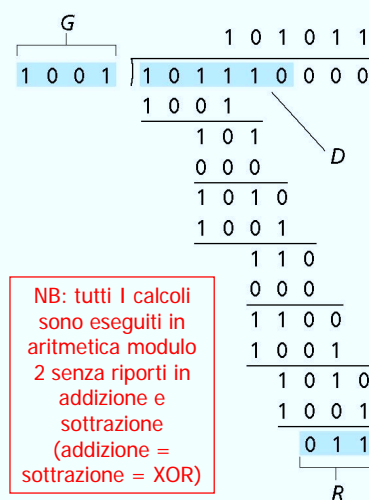
**ossia:**

se dividiamo  $D \cdot 2^r$  per  $G$ , il resto è proprio pari a  $R$ .

In altre parole possiamo calcolare  $R$  come:

$$R = \text{resto} \left[ \frac{D \cdot 2^r}{G} \right]$$

Un esempio con  $r=3$



**NB: tutti i calcoli sono eseguiti in aritmetica modulo 2 senza riporti in addizione e sottrazione (addizione = sottrazione = XOR)**

12

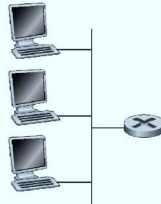
## Tipi di link di rete



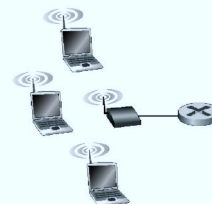
### Due tipi di "link":

- punto-punto:
  - Point to Point Protocol – PPP
  - Serial Line IP – SLIP
- **Broadcast:**
  - mezzo condiviso
    - Ethernet
    - Wavelan
    - Satellite
    - Ecc.

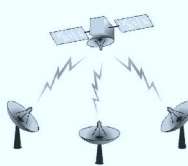
Condivisione con cablaggio  
(per esempio, Ethernet)



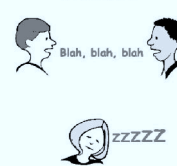
Condivisione senza fili  
(per esempio, Wifi)



Satellite



Cocktail party



13

## Protocolli di accesso multiplo



- Un unico canale di comunicazione condiviso
- Due o più trasmissioni simultanee da parte dei nodi della rete:
  - interferenza
    - Solo un nodo può inviare dati con successo!
- **Protocolli di accesso multiplo:**
  - Un algoritmo distribuito determina le modalità di condivisione del canale, vale a dire *quando* una stazione può trasmettere
  - Le comunicazioni per regolare l'accesso al canale utilizzano il canale stesso!
  - Caratteristiche di un protocollo di accesso multiplo:
    - Sincrono o asincrono
    - Necessità di informazioni riguardanti le altre stazioni
    - Robustezza (ad esempio, in relazione agli errori sul canale)
    - Prestazioni

14

## Gli uomini e l'accesso multiplo: esempio



- Corso di Reti di Calcolatori:
  - Prof e studenti condividono un unico mezzo broadcast:
    - L'aula IA4 (o IA3...) ad Agnano ☺
  - Chi deve parlare?
    - Ipotesi 1: solo il prof
      - Broadcast unidirezionale prof → studenti
      - Mancanza di interazione (modello "televisivo")
    - Ipotesi 2: tutti possono intervenire
      - Necessità di sincronizzazione nell'accesso:
        - » Alza la mano se devi porre una domanda
        - » Non interrompere quando qualcun altro (specialmente il prof!) sta parlando
        - » Dai ai colleghi la possibilità di porre domande (cioè, non monopolizzare la conversazione)
        - » ...
      - Si tratta, in effetti, di *protocolli di comunicazione*

15

## Protocolli di accesso multiplo: tassonomia



- **Channel Partitioning**
  - Suddivide il canale in "porzioni" più piccole (slot temporali o di frequenza)
  - Ogni nodo gode dell'uso esclusivo di una di tali porzioni
- **Random Access**
  - Consente collisioni dovute a trasmissioni simultanee
  - Gestisce le collisioni
- **Taking turns**
  - Coordina opportunamente l'accesso al mezzo, in modo da evitare le collisioni

16

## Protocolli di accesso multiplo: obiettivi



- Per un canale con velocità di  $R$  bit/sec:
  - Se un solo nodo ha dati da inviare:
    - Quel nodo ha un throughput di  $R$  bit/sec
  - Se  $M$  nodi hanno dati da spedire:
    - Ognuno di essi ha un throughput medio di  $R/M$  bit/sec
  - Il protocollo per la gestione dell'accesso è distribuito:
    - Assenza di "single points of failure"
  - Il protocollo è semplice:
    - Implementazione economica

17

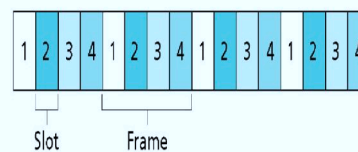
## Protocolli di suddivisione del canale: TDMA



### Time Division Multiple Access

- L'accesso al canale avviene a "cicli":
  - Ogni stazione ottiene uno slot di trasmissione di lunghezza fissa in ogni ciclo
  - Gli slot inutilizzati da una stazione vanno deserti
- Vantaggi:
  - Elimina le collisioni
  - È equo
- Svantaggi:
  - Throughput max per un nodo, in una rete con  $N$  stazioni:
    - $R/N$  bit/sec anche se il nodo in esame è l'unico ad avere frame da spedire
  - Un nodo deve sempre aspettare il suo turno nella sequenza di trasmissione

TDM



Legenda:

- Tutti gli slot etichettati "2" sono dedicati a una specifica coppia sender-receiver

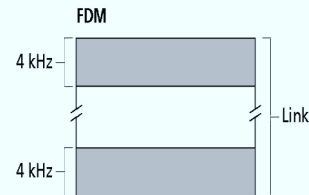
18

## Protocolli di suddivisione del canale: FDMA



### Frequency Division Multiple Access

- Lo spettro di trasmissione è diviso in bande di frequenza
- Ad ogni stazione è assegnata una banda di frequenza fissa
- Il tempo di trasmissione inutilizzato nelle singole bande di frequenza risulta sprecato
- Vantaggi:
  - Come per il TDMA
- Svantaggi:
  - Come per il TDMA



19

## Protocolli di suddivisione del canale: CDMA

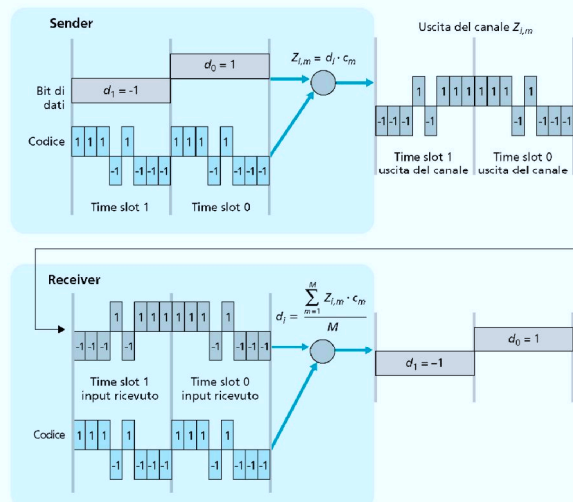


### CDMA (Code Division Multiple Access)

- Un codice unico è assegnato ad ogni utente:
  - *code set partitioning*
- Usato principalmente nei canali wireless di tipo broadcast (reti cellulari, satellitari, ecc.)
- Tutti gli utenti condividono la stessa frequenza di trasmissione, ma ognuno di essi possiede un codice unico (noto come "*chipping sequence*") per codificare i dati
- **segnale codificato** = (dati originali) X (chipping sequence)
- **decodifica**: prodotto scalare del segnale codificato e della chipping sequence
- Consente a diversi nodi di trasmettere simultaneamente, riducendo al minimo l'interferenza nel caso in cui si siano scelti codici "ortogonali"

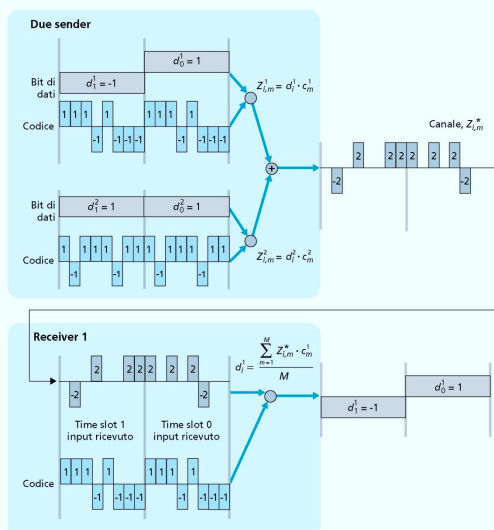
20

## CDMA: codifica e decodifica



21

## CDMA: interferenza tra due mittenti\*



\* CDMA lavora nell'ipotesi che i segnali dei bit trasmessi con interferenza siano cumulativi. 22

## Protocolli ad accesso casuale



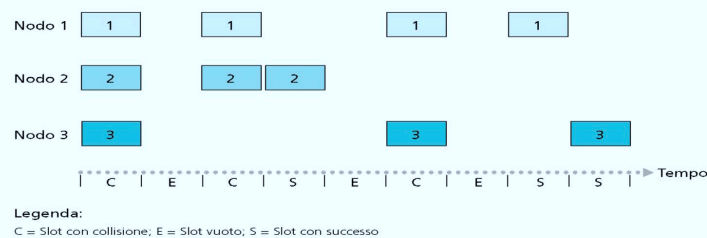
- Quando un nodo ha un pacchetto da trasmettere:
  - Trasmette alla massima velocità consentita dal canale
  - Non esiste nessuna forma di coordinamento *a priori* tra i nodi
- Trasmissione simultanea di due o più nodi:
  - Collisione!
- Un **protocollo ad accesso casuale** specifica:
  - Come rilevare le collisioni
  - Come risolvere le collisioni:
    - Es: tecniche di ritrasmissione delle frame
- Esempi di protocolli *random access*:
  - slotted ALOHA
  - ALOHA
  - CSMA e CSMA/CD

23

## Slotted Aloha



- Tutti i pacchetti sono lunghi L bit e il tempo è diviso in slot di uguale durata ( $L/R$  s)
- Se un nodo ha dati disponibili per la trasmissione:
  - Trasmette all'inizio del primo slot disponibile\*
- In caso di collisione:
  - Ritrasmette il pacchetto negli slot successivi con probabilità  $p$ , finché la trasmissione non va a buon fine



\* Tutti i nodi sono sincronizzati: sanno quando iniziano gli slot

24

## Slotted ALOHA: efficienza



- Qual è la percentuale massima di slot in cui la trasmissione ha successo?
- Supponiamo che  $N$  stazioni abbiano frame da trasmettere:
  - Ogni stazione trasmette in un determinato slot, con probabilità  $p$
  - La probabilità  $S$  che una trasmissione abbia successo è data da:
    - Per il singolo nodo:
      - $S = p(1-p)^{N-1}$
    - Dato che ci sono  $N$  nodi:
      - $S = \text{Prob}(\text{solo uno degli } N \text{ nodi trasmetta}) = N p (1-p)^{N-1}$
      - ...il **valore ottimo** di  $p$ , per  $N$  che tende ad infinito, è:
        - »  $1/e$ , pari a circa il 37%, in altre parole solo il 37% di slot compie lavoro utile

25

## Slotted ALOHA: efficienza massima



$$\begin{aligned} E(p) &= Np(1-p)^{N-1} \\ E'(p) &= N(1-p)^{N-1} - Np(N-1)(1-p)^{N-2} \\ &= N(1-p)^{N-2}((1-p) - p(N-1)) \end{aligned}$$

$$E'(p) = 0 \Rightarrow p^* = \frac{1}{N}$$

$$E(p^*) = N \frac{1}{N} \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{N-1} = \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{N-1} = \frac{\left(1 - \frac{1}{N}\right)^N}{1 - \frac{1}{N}}$$

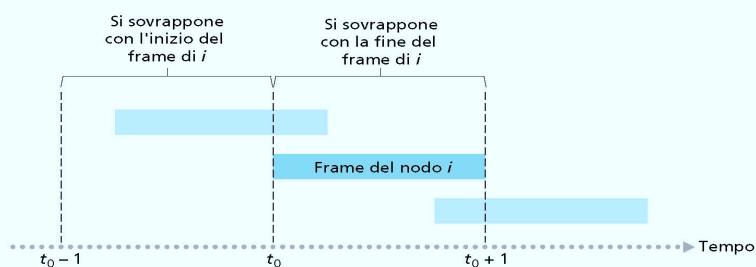
$$\lim_{N \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{N}\right) = 1 \quad \lim_{N \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{N}\right)^N = \frac{1}{e}$$

26

## ALOHA puro



- ALOHA “unslotted”:
  - Più semplice
  - Non richiede sincronizzazione
- In trasmissione:
  - Invia la frame non appena i dati sono disponibili
- La probabilità di collisione raddoppia:
  - Una frame inviata al tempo  $t_0$  può collidere con altre frame inviate in  $[t_0-1, t_0+1]$



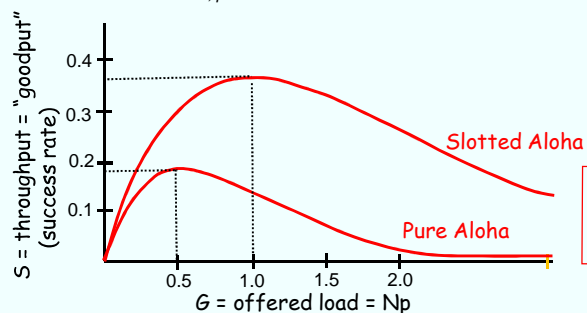
27

## ALOHA puro: prestazioni



- $P(\text{successo di un dato nodo}) =$   
 $P(\text{nodo trasmetta}) \cdot P(\text{nessun altro nodo trasmetta in } [t_0-1, t_0]) \cdot$   
 $P(\text{nessun altro nodo trasmetta in } [t_0, t_0+1]) =$   
 $p \cdot (1-p)^{(N-1)} \cdot (1-p)^{(N-1)} = p \cdot (1-p)^{2(N-1)}$

- $P(\text{successo di uno su } N \text{ nodi}) = N \cdot p \cdot (1-p)^{2(N-1)}$ 
  - ...il valore ottimo di  $p$ , per  $N$  che tende ad infinito, è:
    - »  $1/2e$ , pari a circa il 18%



28

## CSMA: Carrier Sense Multiple Access



### CSMA:

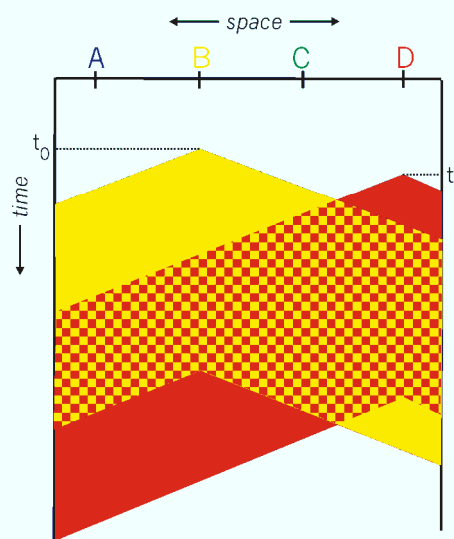
- “Ascolta prima di parlare” (*listen before talking*):
  - Se il canale è libero
    - Trasmetti la frame
  - Se il canale è occupato
    - Rimanda la trasmissione
- CSMA persistente:
  - Riprova immediatamente con probabilità  $p$  quando il canale si libera
- CSMA non persistente:
  - Riprova dopo un intervallo casuale

29

## CSMA: collisioni



- Col CSMA si possono avere collisioni:
  - Il ritardo di propagazione fa sì che due nodi possano non ascoltare le reciproche trasmissioni
- In caso di collisione:
  - Il tempo di trasmissione della frame risulta completamente sprecato
- La *distanza* ed il *ritardo di propagazione* concorrono a determinare la probabilità di collisione



30

## CSMA/CD: CSMA con Collision Detection

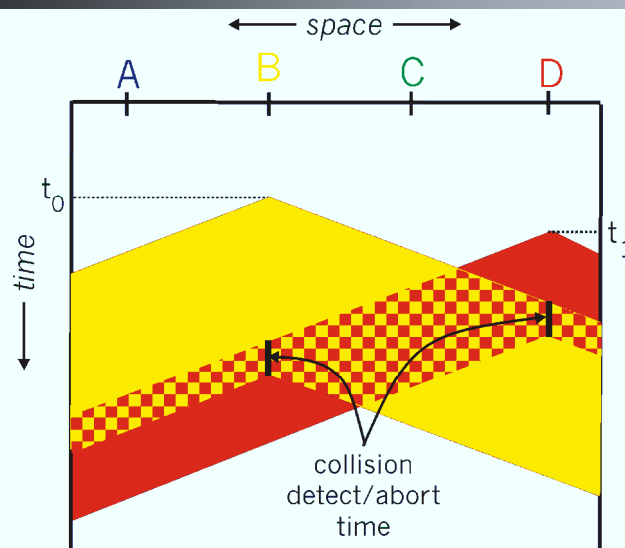


### CSMA/CD:

- “Ascolta mentre parli” (*listen while talking*):
  - Analogo al CSMA, ma in più:
    - Rileva le collisioni durante la trasmissione
    - Le trasmissioni che collidono vengono terminate, riducendo lo spreco di risorse del canale trasmissivo
  - Ritrasmissioni persistenti o non persistenti
- Collision Detection:
  - Si misura la potenza del segnale ricevuto e la si compara con quella del segnale trasmesso

31

## CSMA/CD: funzionamento



32

## Protocolli di tipo “Taking Turns”



### Protocolli “channel partitioning”:

- Condivisione efficiente del canale con carico elevato
- Poco efficienti con carico leggero:
  - Ritardo nell’accesso al canale
  - Banda pari ad  $1/N$  anche se solo uno degli  $N$  nodi presenti è attivo!

### Protocolli “random access”:

- Efficienti con carico leggero:
  - Un singolo nodo può utilizzare a pieno il canale
- Carico elevato:
  - Overhead dovuto alla presenza di collisioni

### Protocolli “taking turns”:

- Cercano di prendere il meglio dai due approcci precedenti!

33

## Tipici protocolli “Taking Turns”

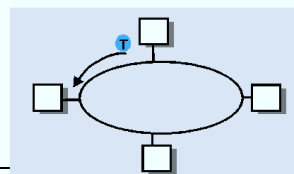


### Polling:

- Un nodo *master* “invita” i nodi *slave* a trasmettere in maniera alternata
- Impiego di messaggi del tipo “Request to Send”, “Clear to Send”
- Problemi da affrontare:
  - Overhead dovuto al polling
  - Latenza
  - Presenza di un single point of failure (master)

### Token passing:

- Un “gettone” (*token*) di controllo viene passato da un nodo al successivo in maniera sequenziale
- Il possesso del *token* dà diritto a trasmettere
- Problemi da affrontare:
  - Overhead nella gestione del token
  - Latenza
  - Presenza di un single point of failure (token)



34