

Architettura di Internet

Luciano Bononi

bononi@cs.unibo.it

<http://www.cs.unibo.it/~bononi/>

Figure credits: some of the figures have been taken from
the book: Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori

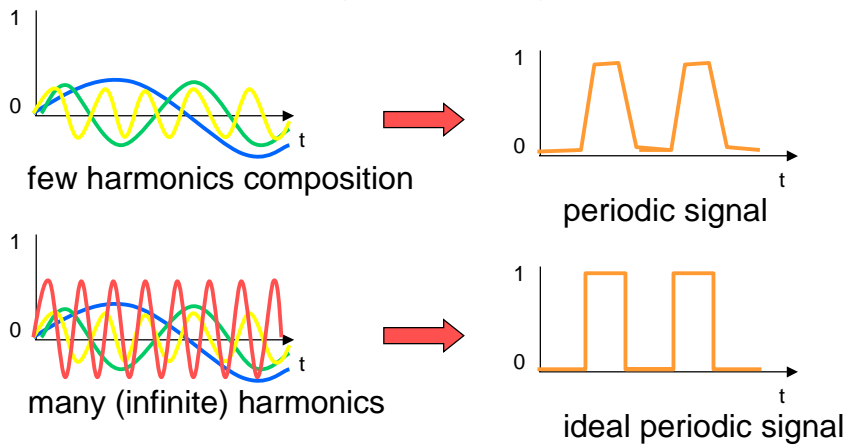
Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Cenni sulla trasmissione digitale: livello fisico

Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

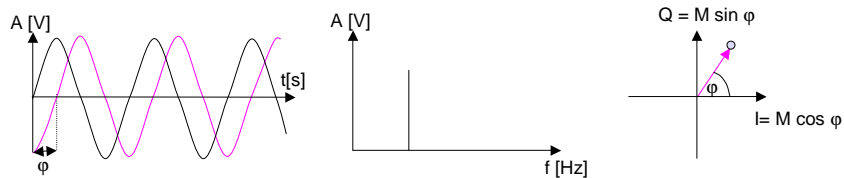
Fourier representation of periodic signals

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$



Signals II

- Different representations of signals
 - amplitude (amplitude domain)
 - frequency spectrum (frequency domain)
 - phase state diagram (amplitude M and phase ϕ in polar coordinates)



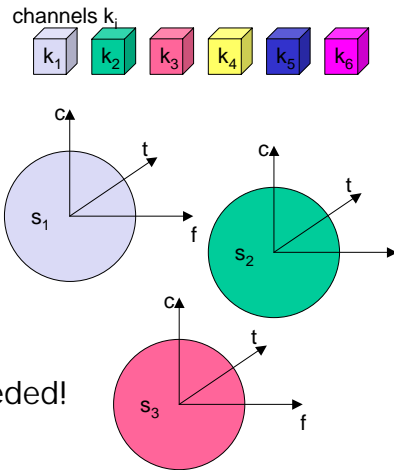
- Composed signals transferred into frequency domain using Fourier transformation
- Digital signals need
 - infinite frequencies for perfect transmission
 - modulation with a carrier frequency for transmission (analog signal!)

Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Multiplexing: multiple use of shared medium

□ Multiplexing in 4 dimensions

- space (s_i)
- time (t)
- frequency (f)
- code (c)



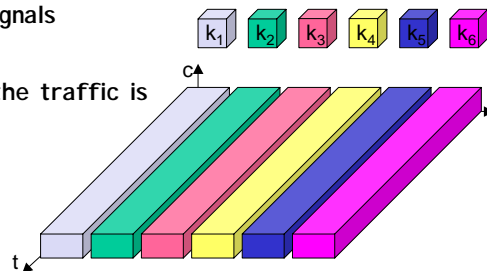
□ Goal: multiple use of a shared medium

□ Important: guard spaces needed!

Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Frequency multiplex

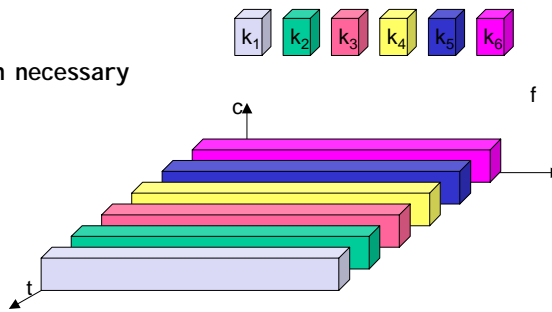
- Separation of the whole spectrum into smaller frequency bands
- A channel gets a certain band of the spectrum for the whole time
- Advantages:
 - no dynamic coordination necessary
 - works also for analog signals
- Disadvantages:
 - waste of bandwidth if the traffic is distributed unevenly
 - inflexible
 - guard spaces



Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Time multiplex

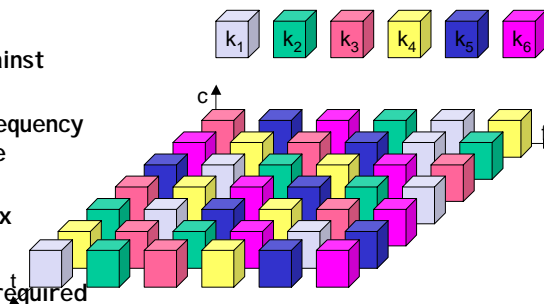
- A channel gets the whole spectrum for a certain amount of time
- Advantages:
 - only one carrier in the medium at any time
 - throughput high even for many users
- Disadvantages:
 - precise synchronization necessary



Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Time and frequency multiplex

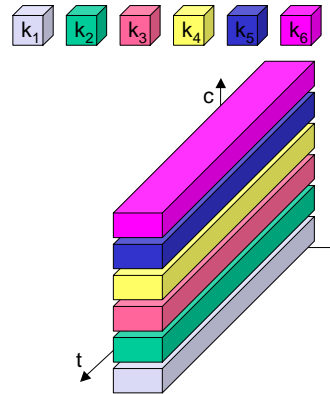
- Combination of both methods
- A channel gets a certain frequency band for a certain amount of time
 - Example: GSM
- Advantages:
 - better protection against tapping
 - protection against frequency selective interference
 - higher data rates compared to code mux
- but:
 - precise coordination required



Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Code multiplex

- ❑ Each channel has a unique code
- ❑ All channels use the same spectrum at the same time
- ❑ Advantages:
 - bandwidth efficient
 - no coordination and synchronization necessary
 - good protection against interference and tapping
- ❑ Disadvantages:
 - lower user data rates
 - more complex signal regeneration (€)
- ❑ Implemented using spread spectrum technology



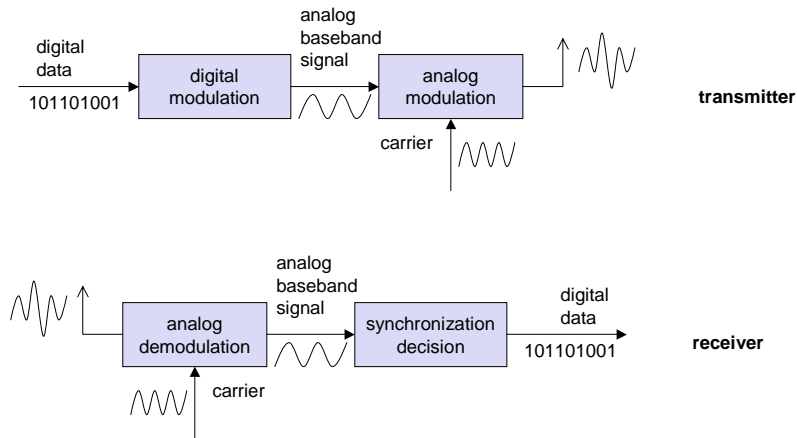
Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Modulation

- ❑ Digital modulation
 - digital data is translated into an analog signal (baseband)
 - ASK, FSK, PSK differences in spectral efficiency, power efficiency, robustness
- ❑ Analog modulation
 - shifts center frequency of baseband signal up to the radio carrier (i.e. FM)
- ❑ Motivation
 - smaller antennas (e.g., $\lambda/4$)
 - Frequency Division Multiplexing
 - medium characteristics
- ❑ Basic schemes
 - Amplitude Modulation (AM)
 - Frequency Modulation (FM)
 - Phase Modulation (PM)

Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

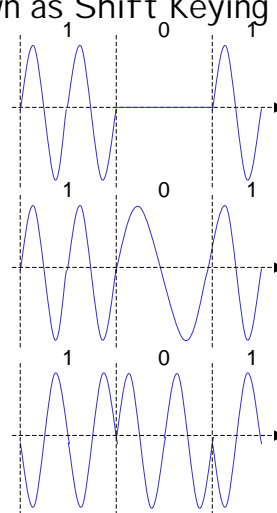
Modulation and demodulation



Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Digital modulation

- Modulation of digital signals known as Shift Keying
- Amplitude Shift Keying (ASK):
 - very simple
 - low bandwidth requirements
 - very susceptible to interference
- Frequency Shift Keying (FSK):
 - needs larger bandwidth
- Phase Shift Keying (PSK):
 - more complex
 - robust against interference

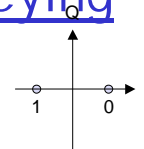


Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Advanced Phase Shift Keying

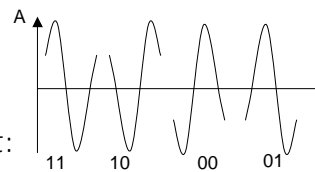
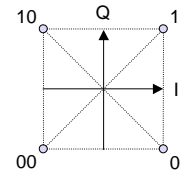
□ BPSK (Binary Phase Shift Keying):

- bit value 0: sine wave
- bit value 1: inverted sine wave
- very simple PSK
- low spectral efficiency
- robust, used e.g. in satellite systems



□ QPSK (Quadrature Phase Shift Keying):

- 2 bits coded as one symbol
- symbol determines shift of sine wave
- needs less bandwidth compared to BPSK
- more complex



- Often also transmission of relative, not absolute phase shift: DQPSK - Differential QPSK (IS-136, PHS)

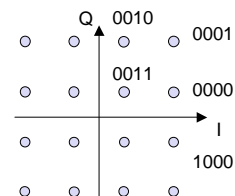
Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Quadrature Amplitude Modulation

- Quadrature Amplitude Modulation (QAM): combines amplitude and phase modulation
- it is possible to code n bits using one symbol
- 2^n discrete levels, $n=2$ identical to QPSK
- bit error rate increases with n , but less errors compared to comparable PSK schemes

Example: 16-QAM (4 bits = 1 symbol)

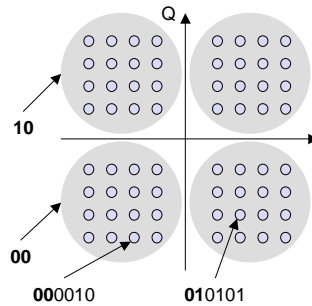
- Symbols 0011 and 0001 have the same phase, but different amplitude.
- 0000 and 1000 have different phase, but same amplitude.
- → used in standard 9600 bit/s modems



Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Hierarchical Modulation

- modulates two separate data streams onto a single stream
- High Priority (HP) embedded within a Low Priority (LP) stream
- Multi carrier system, about 2000 or 8000 carriers
- QPSK, 16 QAM, 64QAM
- Example: 64QAM
 - good reception: resolve the entire 64QAM constellation
 - poor reception, mobile reception: resolve only QPSK portion
 - 6 bit per QAM symbol, 2 most significant determine QPSK
 - HP service coded in QPSK (2 bit), LP uses remaining 4 bit



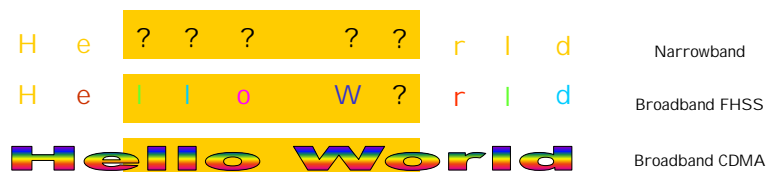
Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Spread spectrum technology

- intuitive example: narrowband interference effect on transmission:
 - transmit "Hello World" coded using narrowband "yellow" frequency and broadband "many colors" frequencies



- a burst of yellow interference adds to the signal for a significant time: what is the result at the receiver?



Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

The Data Link Layer

Obiettivo:

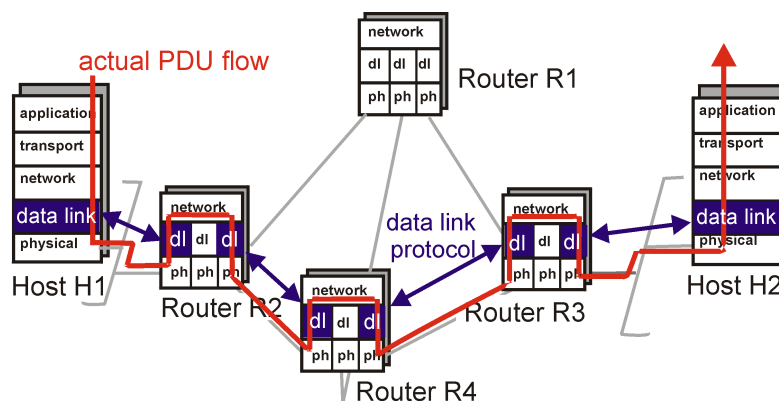
- Capire i principi dei servizi Data Link:
 - error detection, correction
 - Condivisione di broadcast channel: accesso multiplo
 - Indirizzamento fisico
 - Trasferimento dati affidabile, controllo di flusso
- Esempi di tecnologie di livello Data Link alternative

Sommario

- Servizi link layer
- error detection, correction
- Protocolli di accesso multiplo e reti locali (LAN)
- Indirizzamento link layer, ARP
- Tecnologie di livello Link:
 - Ethernet
 - hubs, bridges, switches
 - IEEE 802.11 LANs
 - PPP

Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

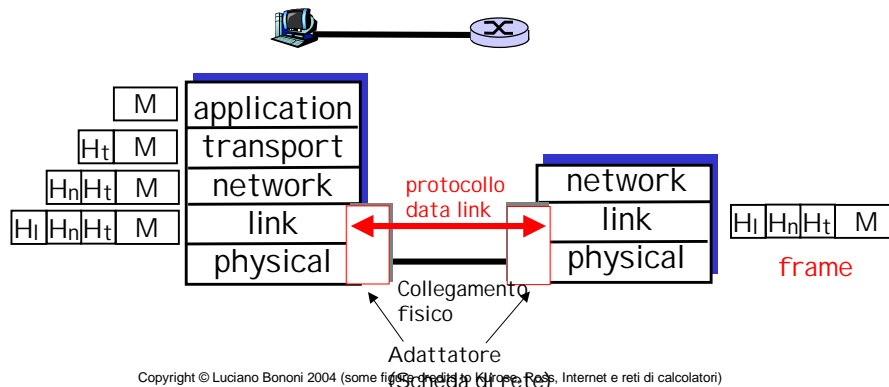
Link Layer: (livello collegamento)



Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Link Layer: definizione del contesto

- Due dispositivi *connessi fisicamente*:
 - host-router, router-router, host-host
- Unità di dati: *frame*



Servizi del livello collegamento

- **Framing, link access:**
 - incapsulare datagram (IP) in frame
 - Aggiungere "la busta": header, trailer
 - Se il mezzo è condiviso si implementa il MAC opportuno
 - "Indirizzo Fisico" (MAC address) usato nei frame headers per identificare mittente e destinatario
 - Diverso dall'indirizzo IP (logico)
- **Consegna affidabile tra due dispositivi direttamente connessi**
 - Tecniche usate poco se il collegamento è molto affidabile (fibre ottiche, alcune tecnologie twisted pair)
 - Collegamenti wireless: alta frequenza di errori
 - Q: perchè serve un meccanismo sia a livello collegamento che end-to-end?

Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

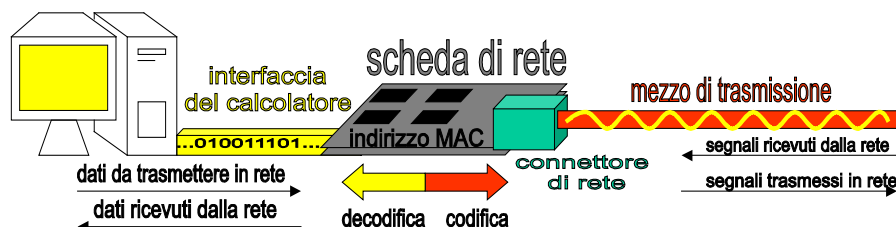
Servizi del livello collegamento

- **Controllo di flusso:**
 - Regola la velocità del mittente rispetto alla capacità di ricezione del destinatario
- **Error Detection:**
 - Errori causati da attenuazione, rumore.
 - Il ricevente rileva la presenza di errori sui bit:
 - Richiede invio di duplicato, e/o elimina il frame errato
- **Error Correction:**
 - Il ricevente identifica *e corregge* errori sul/i bit senza richiedere una ri-trasmissione

Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Link Layer: Implementazione

- Si realizza nell'adattatore (scheda di rete)
 - e.g., PCMCIA card, scheda Ethernet
 - Scheda di rete: RAM, chip DSP, interfaccia bus verso il PC e interfaccia di rete verso il mezzo trasmissivo

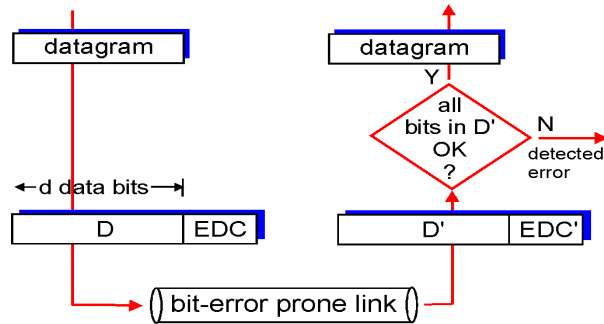


Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Rilevazione di errori (Detection)

EDC= Error Detection and Correction bits (bit ridondanti)
 D = Dati protetti dalla correzione di errore, possono includere headers

- Error detection non è affidabile al 100%
 - il protocollo può non accorgersi di errori, ma ciò è raro!
 - campi EDC più ampi permettono rilevazione e correzione migliore

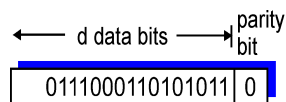


Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Controllo di parità: Parity Checking

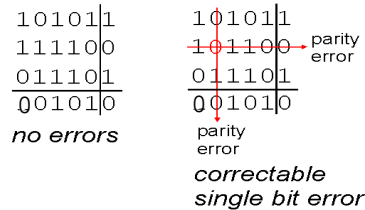
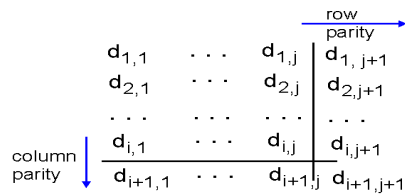
Parità a singolo bit:

Rileva errori singoli su un bit



Parità bidimensionale:

Rileva e *corregge* errori singoli e non



Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Internet checksum

Obiettivo: rilevare errori su bit in una sequenza di bit, ma si usa a livello 4 (trasporto)

Mittente:

- ❑ Considera la sequenza di bit come interi a 16 bit
- ❑ checksum: esegue la somma dei valori della sequenza complementati a uno
- ❑ Il valore finale della somma viene posto nel campo UDP checksum e spedito insieme ai bit

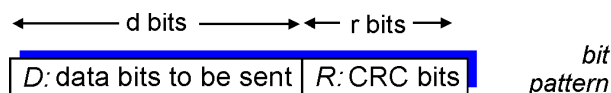
Destinatario:

- ❑ Calcola il checksum sui bit ricevuti
- ❑ Controlla se il valore ottenuto è uguale a quello indicato dal mittente
 - NO - errore rilevato!
 - YES - non si rilevano errori (ma potrebbero essercene comunque...)

Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Cyclic Redundancy Check

- ❑ Siano considerati i bit di dati, **D**, come un numero binario
- ❑ Siano scelti una sequenza di $r+1$ bit (generatore), **G**
- ❑ obiettivo: trovare r bit detti **CRC**, tali che
 - $\langle D, \text{CRC} \rangle$ sia divisibile per G (modulo 2)
 - Anche il destinatario conosce G , e dopo avere ricevuto $\langle D, \text{CRC} \rangle$ divide $\langle D, \text{CRC} \rangle$ per G . Se il resto non è zero: errore rilevato!
 - Vantaggio: possono essere rilevati tutte le sequenze errate fino a $r+1$ bits
- ❑ Molto usato in pratica (es. ATM, HDLC)



$$D * 2^r \text{ XOR } R \quad \text{mathematical formula}$$

Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

*CRC Example

Want:

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

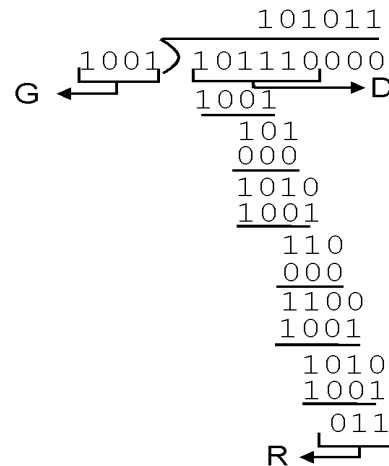
equivalently:

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

equivalently:

if we divide $D \cdot 2^r$ by
G, want remainder R

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

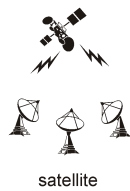
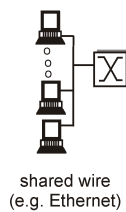


Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Link e protocolli di accesso (multiplo) al mezzo trasmissivo (MAC)

Tre tipi di "links":

- point-to-point (es. cavetto singolo)
 - Es. Protocolli PPP, SLIP
- broadcast (cavetto o mezzo condiviso)
 - es. Protocolli Ethernet, IEEE802.11 Wi-Fi



- commutato (es. switched Ethernet, ATM...)

Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Protocolli MAC e accesso multiplo: canali broadcast

- ❑ Esiste un singolo canale di comunicazione condiviso
 - Le reti LAN si basano molto su questa ipotesi (costi).
- ❑ Due o più trasmissioni simultanee causano collisione!
 - Solo un host alla volta può trasmettere sul canale condiviso
- ❑ *Protocolli MAC ad accesso multiplo:*
 - Algoritmi distribuiti che determinano come le stazioni condividono il canale, cioè: quando trasmette la stazione x?
 - N.B. mettersi d'accordo per trasmettere equivale a dover trasmettere!!!
 - Fattori critici dei protocolli MAC di accesso multiplo:
 - Sincroni o asincroni
 - Che informazione è necessario conoscere riguardo al resto del mondo?
 - Robustezza (rispetto agli errori del canale)
 - Prestazioni

Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

*Multiple Access protocols

- ❑ claim: humans use multiple access protocols all the time
- ❑ class can "guess" multiple access protocols
 - multiaccess protocol 1:
 - multiaccess protocol 2:
 - multiaccess protocol 3:
 - multiaccess protocol 4:

Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

MAC Protocols: tassonomia

Esistono tre classi generali di protocolli MAC:

- ❑ **Suddivisione di canale (Channel Partitioning)**
 - Il canale è diviso "a fette" (time slots, frequency bands)
 - Ogni fetta viene allocata a un nodo per suo uso esclusivo
 - Protocolli rigidi rispetto ad esigenze "leggere"
- ❑ **Accesso casuale (Random Access)**
 - Possono nascere collisioni, ma sono semplici e "resistenti"
 - In caso di collisioni si deve rimediare: si spreca risorse
- ❑ **Prenotazione ciclica o "a turni" ("Taking turns")**
 - L'accesso viene coordinato da leggi che evitano collisioni
 - Sono protocolli rigidi e poco resistenti a guasti

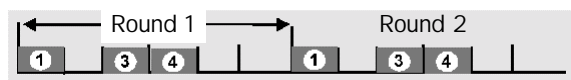
Obiettivi: efficiente, equo, semplice, distribuito

Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

MAC protocols e suddivisione canale: TDMA

TDMA: time division multiple access

- ❑ Si accede al canale (diviso a fette) in "rounds"
- ❑ TDM (Time Division Multiplexing): si divide il tempo del canale in slot
 - Ogni stazione ottiene l'assegnazione di uno slot di lunghezza fissa (pari alla dimensione del frame) in ogni round



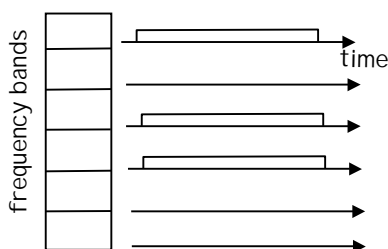
- Slot inutilizzati rimangono vuoti (va male se stazioni trasmettono molto, ma di rado)
- Es.: LAN con 6 host, 1,3,4 hanno dati, 2,5,6 non hanno dati

Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

MAC protocols e suddivisione canale : FDMA

FDMA: frequency division multiple access

- FDM (Frequency Division Multiplexing): La banda totale del canale (spettro delle frequenze) è diviso in bande
- Ogni stazione vede assegnata una banda diversa per tutto il tempo del collegamento
- Le bande possono non essere usate in certi intervalli di tempo
- Es. precedente LAN, 1,3,4 trasmettono, 2,5,6 sprecano le loro bande non avendo dati da trasmettere



Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

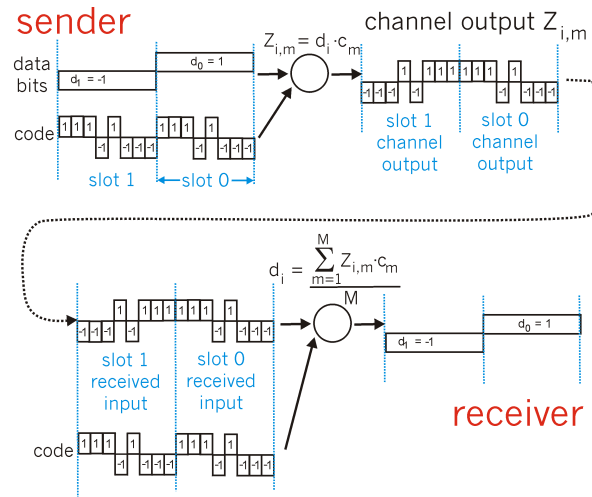
MAC con suddivisione canale (CDMA)

CDMA (Code Division Multiple Access)

- "Codice" unico assegnato ad ogni utente (partizione di codice)
- Usato in canali wireless broadcast (reti cellulari, satellite,...)
- Tutti gli utenti usano lo stesso spettro di frequenza, ma ogni utente usa la propria "chipping sequence" (il codice) per codificare i dati
- *Segnale codificato* = (dati) X (chipping sequence)
- *decodifica*: prodotto interno dei segnali codificati e della chipping sequence
- Permette a utenti multipli di "coesistere" e trasmettere simultaneamente evitando interferenza (se i codici sono "ortogonali")

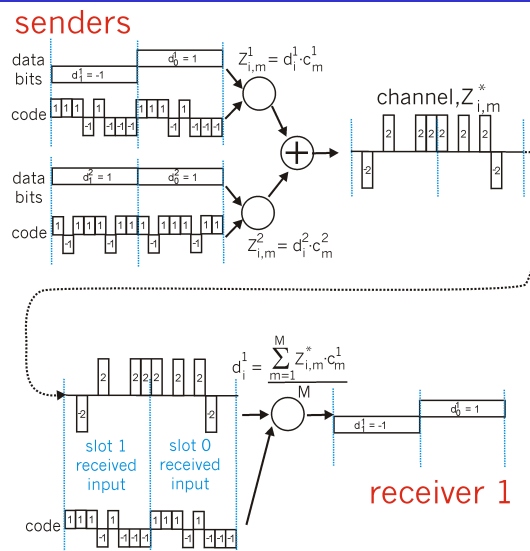
Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

CDMA: Codifica/Decodifica



Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

CDMA: interferenza tra due sender



Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

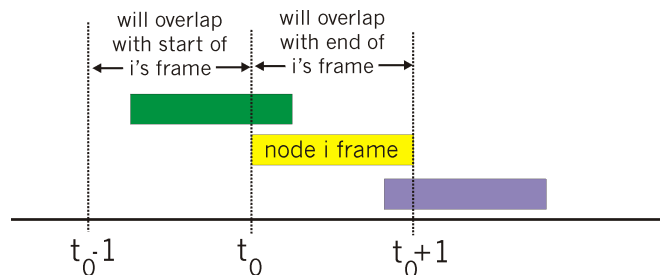
Protocolli MAC Random Access

- Quando un nodo ha pacchetti da spedire
 - Trasmette sfruttando a pieno il data rate R.
 - Non c'è coordinamento precedente alle trasmissioni
- Due o più trasmissioni ricevute -> "collisione",
- **Protocollo MAC random access** specifica:
 - Come rilevare le collisioni
 - Come evitare o risolvere le collisioni (es. Ritardando i tentativi)
- Esempi di random access MAC protocols:
 - ALOHA, slotted ALOHA
 - CSMA, slotted CSMA, CSMA/CA and CSMA/CD

Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

ALOHA

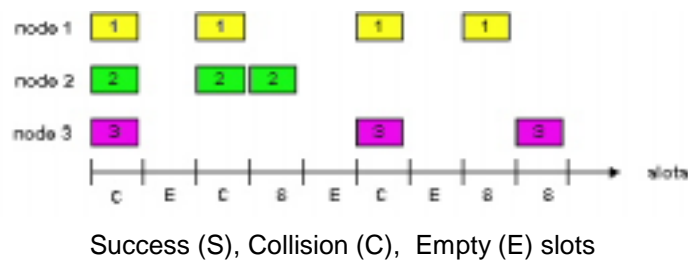
- Aloha: è il più semplice (non sincronizzato)
- Se c'è un pacchetto da spedire
 - spedisce appena possibile
- Vulnerabilità del pacchetto
 - Spedito a t_0 collide con quelli spediti in $[t_0-1, t_0+1]$



Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Slotted Aloha

- Tempo suddiviso in slot = dimensione frame
- Se un nodo deve trasmettere trasmette all'inizio dello slot successivo
- Se c'è collisione: ritrasmette in uno slot successivo con probabilità p , finché non riceve Ack (ARQ)



Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

CSMA: Carrier Sense Multiple Access

- CSMA:** ascolta prima di trasmettere
- Se il canale è libero: trasmette il frame
 - Se il canale è occupato: aspetta
 - **Persistent CSMA:** riprova subito con probabilità p appena il canale diventa libero
 - **Non-persistent CSMA:** riprova dopo un tempo casuale
 - Analogia umana: non interrompe chi parla
 - Usato per Ethernet (CSMA/CD) e IEEE 802.11 (CSMA/CA)

Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

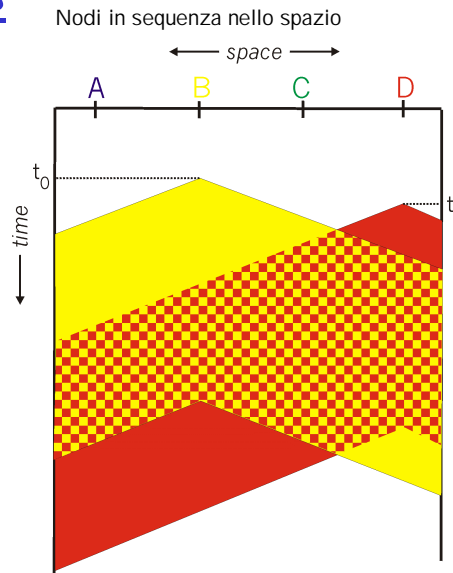
CSMA collisions

Una collisione si verifica:
A causa del ritardo di propagazione due nodi possono iniziare insieme senza rilevarsi

Collisione

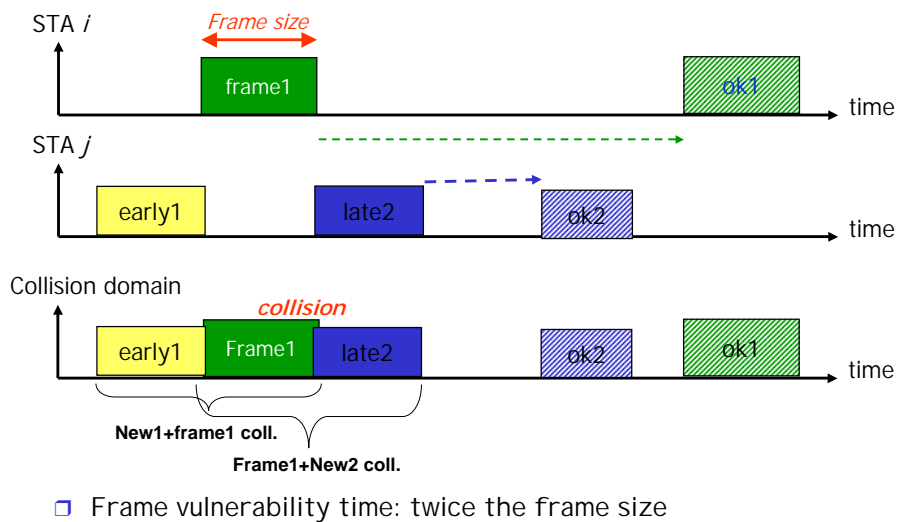
Va perduto tutto il frame e tutto il tempo di trasmissione

Distanza e probabilità di collisione sono in relazione tra loro



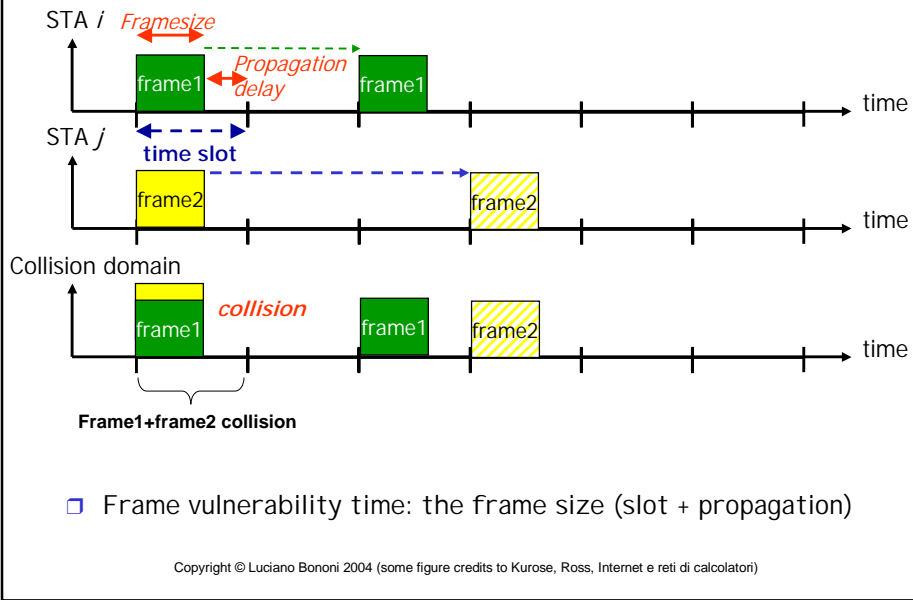
Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

The ALOHA protocol

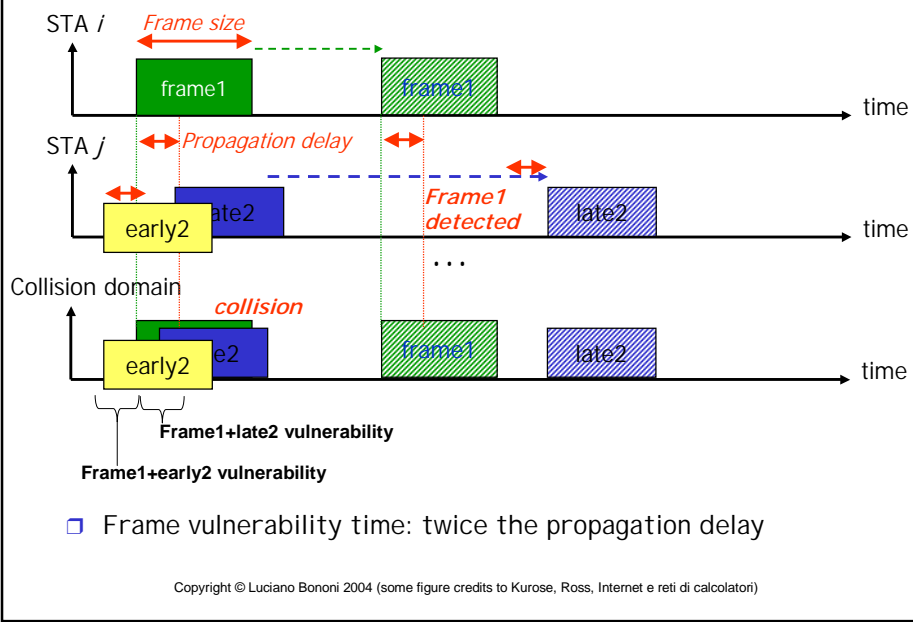


Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

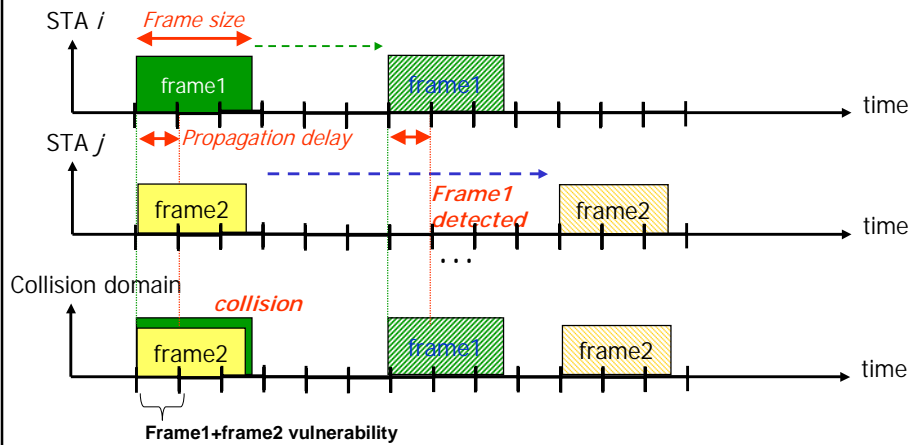
Slotted ALOHA



CSMA Protocol



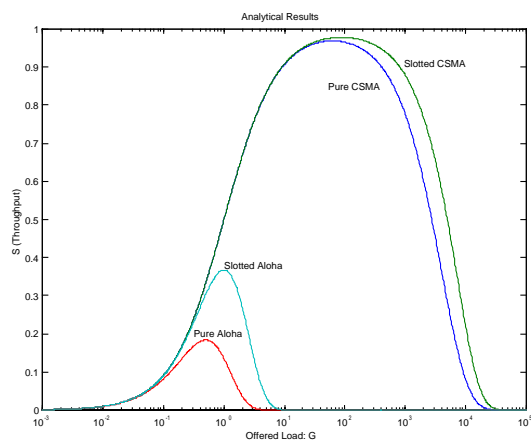
Slotted CSMA Protocol



- Frame vulnerability time: the propagation delay

Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

Confronto tra throughput



Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

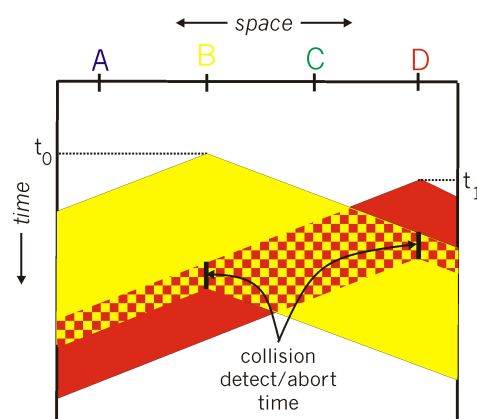
CSMA/CD (Collision Detection)

CSMA/CD: come CSMA ma...

- Le collisioni sono rilevate quasi immediatamente
- Collisioni interrotte appena rilevate
- Ritrasmissione persistente o non persistente
- collision detection (CD):
 - Fattibile in reti wired: misuro la forza relativa dei segnali
 - Difficile in reti wireless!!

Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

CSMA/CD collision detection



Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

MAC protocols "a turni"

Protocolli MAC a partizione di canale:

- Efficiente condivisione per alti carichi
- Inefficiente per bassi carichi: ritardo di accesso, $1/N$ banda allocata anche se c'è solo un nodo attivo

Protocolli MAC Random access

- Efficiente per bassi carichi: un solo nodo usa tutto il canale
- Alti carichi: troppe collisioni

protocolli MAC a turni

Compromesso tra i due (ma non sempre pratico)

Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)

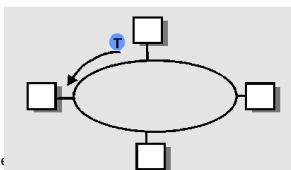
MAC protocols "a turni"

Polling:

- Un nodo master invita gli altri nodi a trasmettere
- RTS/CTS
- svantaggi
 - polling overhead
 - latenza
 - Singolo punto di fallimento (master)

Token passing:

- Un pacchetto TOKEN viene passato a rotazione
- Chi ha il token trasmette!
- svantaggi
 - token overhead
 - Latenza
 - Singolo punto di fallimento (token)



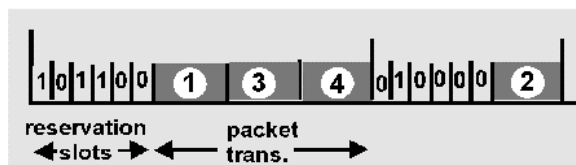
Copyright © Luciano Bononi 2004 (some

alcolatori)

Protocolli Reservation-based

Polling Distribuito:

- Tempo suddiviso in slots
- All'inizio ci sono N piccoli **reservation slots**
 - reservation slot = ritardo propagazione end-to-end
 - Chi vuole trasmettere occupa un reservation slot che viene visto da tutte le stazioni.
 - Dopo gli slot di reservation si trasmette in base alla priorità di accesso



Copyright © Luciano Bononi 2004 (some figure credits to Kurose, Ross, Internet e reti di calcolatori)