

La famiglia di protocolli per reti locali IEEE 802.X

Davide Quaglia

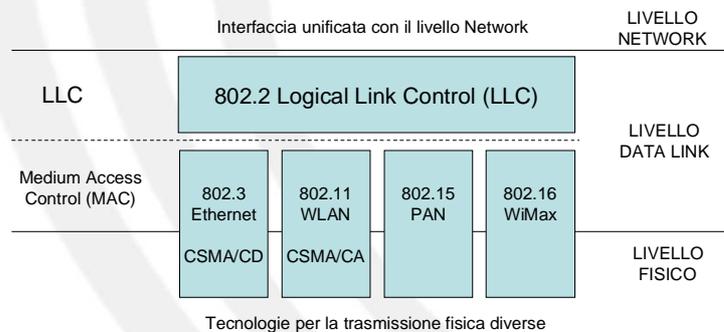
Limiti dei collegamenti punto-punto

- RS-232 (vecchia seriale), USB, Firewire sono protocolli punto-punto, cioè collegano coppie di macchine
- Per collegare tra loro N macchine occorrerebbero $N(N-1)$ cavi e connettori !
- Occorre introdurre un canale condiviso e delle regole per
 - identificare univocamente le macchine
 - decidere il turno di utilizzo
- Nasce il concetto di LAN e il livello Datalink

Local Area Network (LAN)

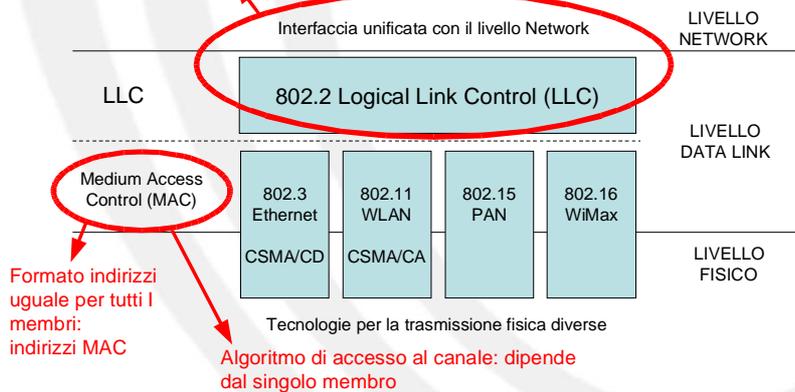
- **Situazione**
 - Apparecchiature indipendenti
 - Canale ad alta capacità ma condiviso da più stazioni
- **Problemi**
 - Individuare univocamente le macchine
 - Stabilire chi in ogni istante utilizza il canale
- **Soluzione: famiglia di standard IEEE 802.X**

Famiglia IEEE 802.X



Famiglia IEEE 802.X

Protocollo Internet e applicazioni (web, email, ecc) funzionano indipendentemente da Ethernet, WLAN, ecc...



Famiglia IEEE 802.X

- 802.1 bridge tra MAC diversi
- 802.3 Ethernet (10 Mb/s)
 - 802.3u Fast Ethernet (100 Mb/s)
 - 802.3z Gigabit Ethernet (1 Gb/s)
 - 802.3ae 10 Gigabit Ethernet (10 Gb/s)
- 802.10 Sicurezza nelle LAN
- 802.11 Wireless LAN
- 802.15.X Wireless Personal Area Network
- 802.16 Wireless geografico - WiMax

Medium Access Control (MAC)

- Indirizzamento delle stazioni
 - Unicast
 - Multicast
 - Broadcast
- Accesso e condivisione del canale

Indirizzi MAC

- 6 byte
- 3 byte assegnati dall'IEEE (Organization Unique Identifier - OUI)
 - Al costruttore della scheda
 - All'ente di standardizzazione di un certo protocollo
- 3 byte assegnati in modo progressivo dal costruttore alle sue schede

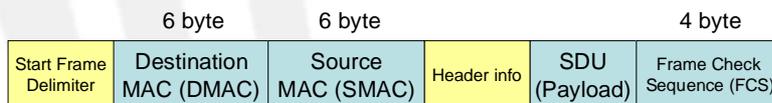
Primo byte dell'OUI

- Bit in posizione 0 (bit meno significativo)
 - “0” → indirizzo individuale (unicast)
 - “1” → indirizzo multicast/broadcast
- Bit in posizione 1
 - “0” → indirizzo assegnato ufficialmente
 - “1” → indirizzo deciso localmente

Indirizzi MAC multicast

- Il primo byte deve essere un numero dispari (bit meno significativo a “1”)
- Individuano un sotto-insieme delle stazioni presenti sulla rete
- Caso particolare: tutte le stazioni
 - 0xFF 0xFF 0xFF 0xFF 0xFF 0xFF

Formato della MAC PDU (frame)



- I campi gialli dipendono dallo specifico protocollo
- La lunghezza max e min di un frame dipendono dallo specifico protocollo
- FCS è un codice per la rilevazione di errore (CRC)
- I frame sono delimitati da
 - Start Frame Delimiter (SFD)
 - Spazio minimo tra frame (Inter Frame Gap)

Ricezione di un frame

- Ogni scheda di rete ha
 - Un proprio indirizzo MAC assegnato dal costruttore (MAC_{HW})
 - Un registro per ospitare un indirizzo MAC assegnato opzionalmente dal software di rete (MAC_{SW})
 - Una lista (eventualmente vuota) di indirizzi MAC multicast di interesse compilata dal SW di rete (MAC_{mcast})

Ricezione di un frame (2)

- Più stazioni hanno accesso allo stesso mezzo fisico (mezzo condiviso)
- Una stazione passa un frame al sistema operativo (interrupt HW) se
 - $(DMAC == MAC_{HW}) \parallel (DMAC == MAC_{SW}) \parallel (DMAC \text{ in } MAC_{mcast})$
 - Lunghezza frame \geq lunghezza minima
 - Frame Check Sequence corretta

Ethernet e le sue evoluzioni

Davide Quaglia

CSMA/CD

- Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
- Carrier Sense = prima di trasmettere ascolto se il canale e' libero
- Multiple Access = piu' stazioni, credendo libero il canale, possono iniziare la trasmissione
- Collision Detection = durante la trasmissione verifico se quanto passa sul canale e' dovuto solo alla mia trasmissione
 - I bit ricevuti sono diversi da quelli trasmessi

Collisione

- Le staz. trasmittenti sospendono l'invio del frame e trasmettono una *sequenza di jamming* (32-48 bit)
 - Si genera un *frammento di collisione*
- Le stazioni riceventi scartano il frame ricevuto perché minore della lung. minima oppure perché fallisce il controllo del CRC
- Le stazioni che hanno interrotto la trasmissione ritentano dopo un tempo casuale (alg. di backoff)

Algoritmo di Back-off

- Truncated binary exponential back-off
- All' n -esimo tentativo di trasmissione il tempo di attesa è scelto casualmente nell'intervallo $[0, 2^k) \cdot \text{slot_time}$ con $k = \min(n, 10)$
- Esempi:
 - $n=1 \rightarrow [0, 1] \cdot \text{slot_time}$
 - $n=2 \rightarrow [0, 3] \cdot \text{slot_time}$
 - ...
 - $n=16 \rightarrow [0, 1023] \cdot \text{slot_time}$
- Dopo 16 volte l'interfaccia di rete manda un messaggio di errore al sistema operativo

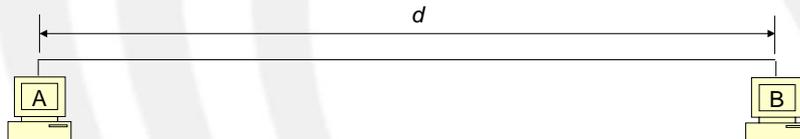
Esercizi

- Data una velocità dell'interfaccia di B bit/s e una velocità di propagazione sul mezzo fisico di V m/s
- Tempo di bit

$$T_{bit} = \frac{1}{B}$$
- Lunghezza del bit

$$L_{bit} = \frac{V}{B}$$
- $V=300 \cdot 10^6$ m/s per onde radio e $200 \cdot 10^6$ m/s per doppino in rame e fibra ottica.

Segmento di collisione



- A inizia a trasmettere perché trova il canale vuoto
- I bit del frame di A raggiungono B dopo d/V sec.
- B inizia a trasmettere 1 bit prima dell'arrivo del frame di A
 - Trasmette 1 bit e poi la sequenza di jamming
- La seq. di jamming arriva ad A dopo d/V sec.
- Affinché A si accorga della collisione deve essere ancora in fase trasmissiva cioè il tempo di trasmissione del frame più corto deve essere maggiore o uguale a $2d/V$ sec. detto *round trip delay*

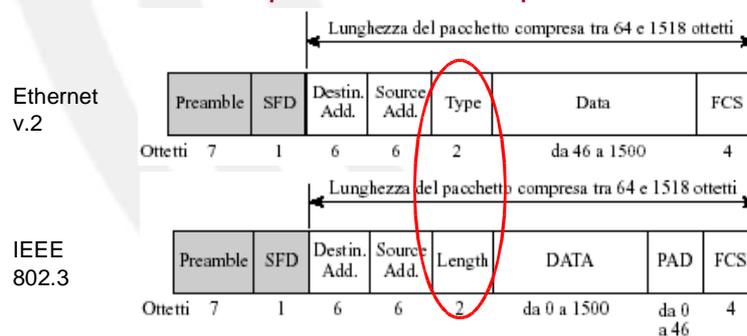
Segmento di collisione (2)

- In CSMA/CD il max valore di d e la min lunghezza di un frame L sono legati

$$\frac{L_{\min}}{B} \geq \frac{2d_{\max}}{V}$$

Ethernet/IEEE 802.3

- Ethernet v.2 → IEEE 802.3
 - differiscono per un solo campo del frame

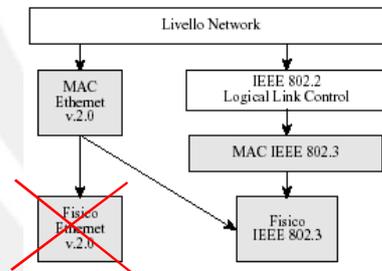


Frame Ethernet/IEEE 802.3

- Preambolo: seq. di 7 byte per sincronizzare il clock del ricevitore
- Start Frame Delimiter (SFD): indica l'inizio del frame
- Type: codice del protocollo contenuto nel payload
- Length: lunghezza in byte della parte utile del payload
- PAD: byte di padding nel caso che con i soli dati non si riesca a raggiungere la dim min di 64 byte

Ethernet/IEEE 802.3

- Oggi il formato MAC Ethernet v.2 si usa ancora come alternativa a 802.3+LLC però si usa il livello fisico 802.3 perché il livello fisico Ethernet v.2 è ormai obsoleto.



Ethernet/IEEE 802.3

- Come si fa a distinguere un frame Ethernet v.2 da un frame 802.3 ?
- I codici contenuti nel campo Type hanno tutti valori maggiori di 1500
 - Ad es. IP ha codice 0x0800 (2048)
- Il campo Length puo' contenere al max il valore 1500

Parametri di Ethernet/802.3

- Slot time: 512 bit
- Inter Packet Gap: 96 bit
- N max tentativi di trasmissione: 16
- Limite di back-off: 10
- Seq. jamming: 32-48 bit
- Frame length:
 - Max: 1518 byte
 - Min: 64 byte
- Velocita' dell'interfaccia: 10 Mb/s

Sottolivello LLC

- Deriva da HDLC ma non necessita di sincronizzazione ne' di delimitazione di frame (e quindi neanche di bit-stuffing)
- In DSAP/SSAP sono contenuti i codici dei protocolli di liv. 3 di arrivo/partenza
 - Si possono usare solo i protocolli dell'ISO



Sub Network Access Protocol (SNAP)

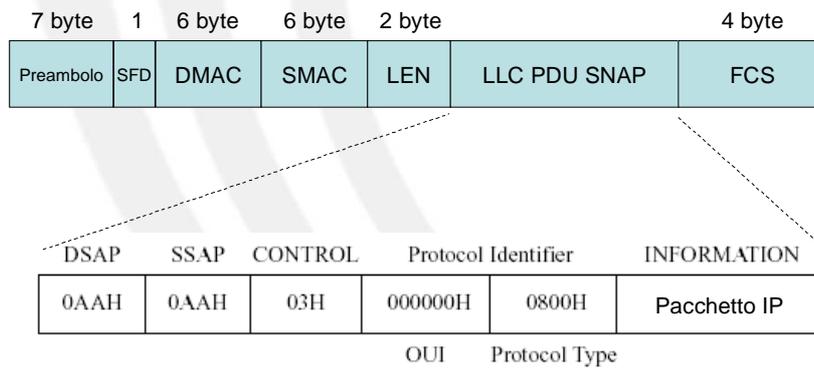
- Per imbustare in LLC protocolli di liv. 3 non ISO (ad es. IP) occorre ricorrere alla PDU di tipo LLC-SNAP

DSAP	SSAP	CONTROL	Protocol Identifier		INFORMATION
0AAH	0AAH	03H			L3-PDU
			OUI	Protocol Type	

IP su Ethernet v. 2

7 byte	1	6 byte	6 byte	2 byte	4 byte	
Preambolo	SFD	DMAC	SMAC	0x0800	Pacchetto IP	FCS

IP su 802.3/LLC



Ethernet/802.3 punto-punto

- 10baseT → doppino
 - 2 coppie: una per trasmettere e una per ricevere
- 10base F → fibra ottica
 - 2 fibre: una per trasmettere e una per ricevere
- Topologie a stella e ad albero con intermediate system (hub e switch)

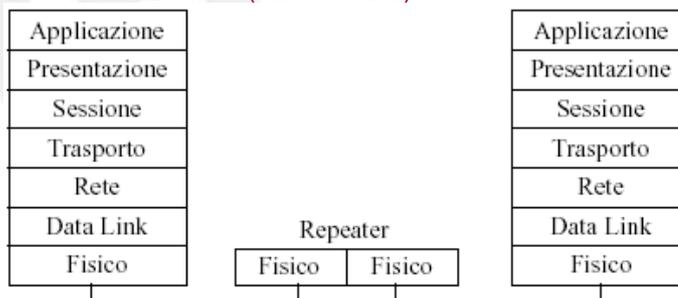


Multi-port repeater (hub)

- Propaga su tutte le porte i frame e i frammenti di collisione ricevuti su una porta
- Ricostruisce i bit
 - A causa di introduzione di ritardo può avvicinare i frame tra loro
- Gli hub e tutte le stazioni ad essi collegate formano un unico *dominio di collisione*
 - Capacità condivisa tra tutte le stazioni (Ethernet condiviso)
 - Trasmissione half-duplex cioè non si può contemporaneamente trasmettere e ricevere perché occorre rilevare le collisioni

Multi-port repeater (2)

- L'hub può collegare reti con lo stesso MAC 802 ma livello fisico diverso
 - Stessa velocità di interfaccia
 - Diverso mezzo fisico (es. UTP/fibra)



Norme di installazione

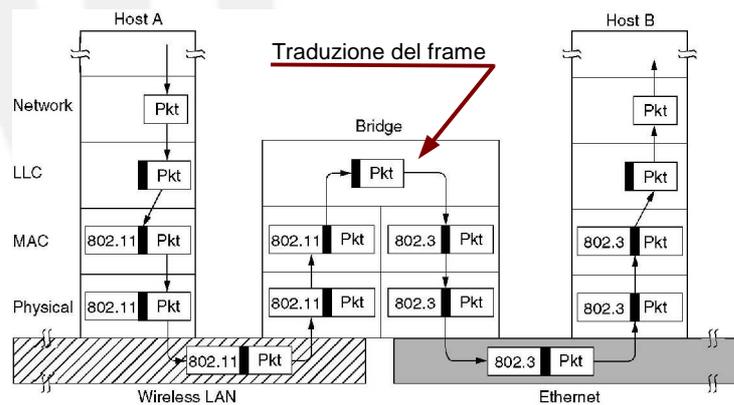
- Segmento = cavo hub-stazione o hub-hub
- Lunghezza max segmento
 - 100 m per UTP
 - 2000 m per fibra
- Dominio di collisione per Ethernet condiviso a 10 Mb/s
 - Tra 2 stazioni del dominio di collisione non ci devono essere più di 4 segmenti e 3 hub a causa del loro contributo al round trip time



Switch/Bridge

- Commutazione tra porte
- Accodamento in memoria dei frame (store&forward)
- Eliminazione frame errati e frammenti di collisione
- **Selective flooding** se non si conosce l'associazione MAC/porta
- Algoritmo di **backward learning**
- Selective flooding dei frame multicast e broadcast
- Spezzano il dominio di collisione ma non di mcast/bcast
- Possono collegare reti 802 diverse
 - 802.3 e 802.11
 - 802.3 a 10 Mb/s e 802.3 a 100 Mb/s (velocità diverse !)

Switch/Bridge (2)



Switch/Bridge (3)

- Maggiore sicurezza sebbene debole
 - Flooding iniziale
 - Possibile attacco che sporca la tabella MAC/porta (poisoning)

Switch/Bridge (4)

- Gli switch non propagano collisioni
 - Ogni stazione dispone di tutta la velocità dell'interfaccia
- In 802.3 tra stazione e switch (oppure tra switch) non serve più CSMA/CD (Ethernet dedicato)
 - Lunghezza cavi dipendente solo dalla attenuazione
 - Trasmissione e ricezione contemporanea (full-duplex) con aumento dei frame scambiati

Selective flooding

- I frame che arrivano da una certa porta vengono trasmessi su tutte le altre
- Infatti non ha senso trasmetterlo anche sulla porta dalla quale proviene

Backward learning

- Lo switch impara quali indirizzi MAC hanno le stazioni attaccate su una certa porta guardando il campo source MAC dei frame che arrivano su quella porta
 - L'associazione MAC/porta è multi-a-uno perché a quella porta può essere attaccato un intero sotto-albero della rete
- Le associazioni imparate si aggiornano dinamicamente nel tempo
- Nessun intervento umano è richiesto

Standard 802.1D

- Standardizza le funzionalità degli switch /bridge
- Traduzione MAC (802.3-802.11-802.16)
- Supporto a topologie magliate
 - Collegamenti ridondanti per sopperire ad eventuali cadute di link
 - Problema: duplicazione frame
 - Soluzione: spanning tree

Spanning tree

- Algoritmo distribuito su tutti gli switch/bridge
- Scambio periodico di frame multicast (bridge PDU) sullo stato dei propri link
- Copertura del grafo ciclico mediante un albero
 - disattivazione dei link ridondanti
- Riattivazione di link in caso di guasti
 - Notifica esplicita
 - Bridge PDU periodiche

Spanning tree (2)

- Ogni switch, porta, link ha un peso assegnato dal gestore della rete
- Ogni porta ha uno stato (blocked, listening, learning, forwarding)
- Bridge PDU
 - MAC mcast 0x01-0x80-0xC2-0x00-0x00-0x00
 - LLC SAP = 0x42

IEEE 802.3u (Fast Ethernet)

- Velocità dell'interfaccia: 100 Mb/s
- Tutti gli altri parametri come in 802.3
- Mezzi fisici supportati
 - 100baseT4: 4 coppie UTP cat. 3
 - 100baseTX: 2 coppie UTP cat. 5
 - 100baseFX: fibra ottica
- Interoperabilità con interfacce 802.3 mediante *interfacce auto-sensing* e *N-way auto-negotiation*

Norme di installazione 802.3u

- Lunghezza segmento
 - 100 m per UTP
 - 2000 m per fibra
- Dominio di collisione per Ethernet Condiviso a 100 Mb/s
 - Tutte le considerazioni fatte per 802.3 rimangono valide ma il dominio di collisione è ridotto di un fattore 10
 - Tra 2 stazioni del dominio di collisione non ci devono essere più di 2 segmenti e 1 hub a causa del loro contributo al round trip time
- Nessun limite in caso di uso di switch

IEEE 802.3z (Gigabit Ethernet)

- Velocita' dell'interfaccia: 1000 Mb/s
- Tutti gli altri parametri come in 802.3 e 802.3u
- Mezzi fisici supportati
 - 1000baseT: 4 coppie UTP cat. 5 (max 100 m)
 - 1000baseSX: fibra multimodale (max 550 m)
 - 1000baseLX: fibra multimod./monomod. (max 5000 m)

Norme di installazione 802.3z

- Ethernet Condiviso a 1 Gb/s
 - Tutte le considerazioni fatte per 802.3 rimangono valide ma il dominio di collisione è ridotto di un fattore 100
 - Tra 2 stazioni del dominio di collisione non ci devono essere più di 2 segmenti e 1 hub
 - Dim. min del blocco di dati trasmesso da una stazione: 512 byte
 - Una staz./hub può incollare tra loro più frame (Frame bursting)
 - Padding all'esterno del frame (carrier extension)

IEEE 802.3ae (10 Gigabit Ethernet)

- Standard del 2002
- Velocità interfaccia 10 Gb/s
- Solo modalità dedicata (commutata)
 - Full-duplex
- Solo fibra ottica (anche più comunicazioni per fibra con WDM)
- Livello fisico compatibile con SDH/Sonet per l'utilizzo su reti geografiche progettate per la telefonia

I protocolli wireless della famiglia IEEE 802

Davide Quaglia

Problemi delle wireless LAN

- Interferenza e caduta di potenza del segnale
 - Alta probabilità che il frame sia ricevuto in modo errato
- Gestione delle collisioni più complicata
 - Hidden node
 - Nodo esposto

Interferenza e caduta di potenza

- Più apparati usano la banda radio (perché banda non sottoposta a licenze d'uso)
 - Altre stazioni wireless
 - Telecomandi
 - Forni a micro-onde
- L'energia del segnale decade col quadrato della distanza tra TX e RX
- Presenza di ostacoli (muri, ecc...)
- Riflessioni multiple del segnale causano distorsione al ricevitore

Probabilità di ricevere un frame corretto

- Probabilità di ricevere un bit corretto

$$(1 - P_{bit}^{errore})$$

- Probabilità di ricevere correttamente un frame di lunghezza N

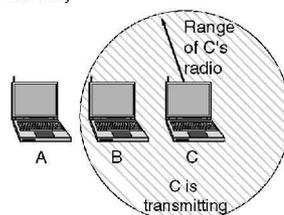
$$P_{ok}^{frame} = (1 - P_{bit}^{errore})^N$$

– Nel caso peggiore $N=1528*8=12144$ bit

- Caso Ethernet $P_{bit}^{errore} = 10^{-10} \Rightarrow P_{ok}^{frame} = 0.9999988$
- Caso WiFi $P_{bit}^{errore} = 10^{-4} \Rightarrow P_{ok}^{frame} = 0.2968700$

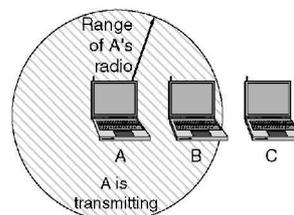
Hidden node e nodo esposto

A wants to send to B
but cannot hear that
B is busy



(a)

B wants to send to C
but mistakenly thinks
the transmission will fail



(b)

- Hidden node
- Nodo esposto

Conseguenze

- Il Collision Detection del CSMA/CD non è più molto conveniente
 - Costruire un componente HW che trasmetta e riceva contemporaneamente è più costoso
 - Molte collisioni non sarebbero rilevabili perché avvengono al ricevitore
- --> Collision Avoidance
- --> Utilizzo ack con Stop&Wait

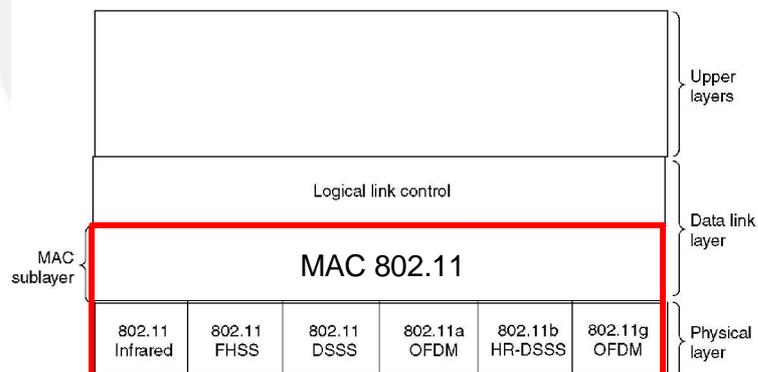
Caratteristiche fisiche 802.11

- Staz. fisse e mobili in ambito locale
 - Bassa velocità di spostamento (<20 km/h)
 - Max 1 km di raggio
- Bande ISM centrate su 2.4 GHz e 5 GHz
- Potenza tra 10mW a 100mW
 - Riduzione interferenze
 - Aumento della durata batterie
 - Minore inquinamento

Suddivisione canale fisico in canali logici

- Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)
 - TX e RX cambiano continuamente frequenza radio all'interno della banda consentita
- Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
 - Suddivisione dei dati su più canali all'interno della banda consentita
- Orthogonal Frequency Spread Spectrum
 - Suddivisione dei dati su più canali all'interno della banda consentita (più efficiente di DSSS)

Famiglia 802.11



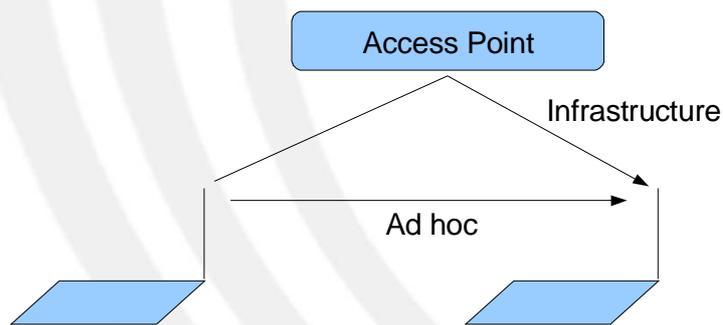
Sotto-livello fisico di 802.11

- 802.11: 1-2 Mb/s
 - Infrarosso
 - Radio 2.4 GHz con FHSS e DSSS
- 802.11b: 1-2-5.5-11 Mb/s
 - Radio 2.4 GHz con High Rate DSSS
- 802.11a: 5 GHz, OFDM, 54 Mb/s
- 802.11g: 2.4 GHz, OFDM, 54 Mb/s

Sotto-livello MAC di 802.11

- **ad hoc**: trasmissione diretta tra stazioni
- **infrastructure**: trasmissione attraverso **Access Point**
- Distributed Coordination Function (DCF)
 - metodo CSMA/CA
 - per modalità ad hoc ed infrastructure
- Point Coordination Function (PCF)
 - polling dell'Access Point alle stazioni
 - solo per infrastructure

Ad hoc vs. Infrastructure



Servizi forniti dalle stazioni

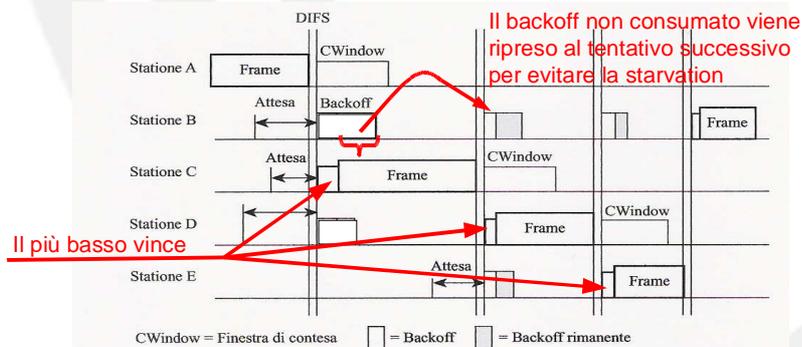
- Autenticazione
- Associazione ad un Access Point
- Disassociazione
- Cifratura

Distributed Coordination Function

- CSMA/CA
- Distributed Interframe Space (DIFS)
- Short Interframe Space (SIFS)
- Problema della starvation
- Ack (Stop&Wait) - no per broadcast/mcast
- Short Interframe Spacing (SIFS)
- RTS e CTS - no per broadcast/mcast:
- Network Allocation Vector (NAV)

CSMA/CA

- A sta trasmettendo
- B, C, D, E hanno un frame da trasmettere

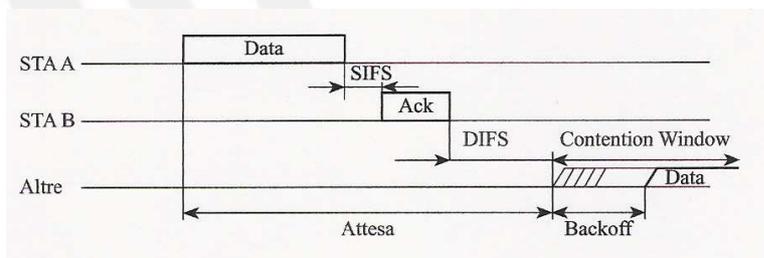


Acknowledge

- All'arrivo di un frame di dati il destinatario controlla il campo Frame Check Sequence (FCS) in cui un CRC rileva l'eventuale presenza di errori
- Se il frame è ok viene inviato un frame di acknowledge al trasmettitore
- Se il trasmettitore non riceve ack entro un certo tempo rimanda il frame di dati

DIFS e SIFS

- $SIFS < DIFS$ e quindi l'ack ha priorità su nuovi pacchetti

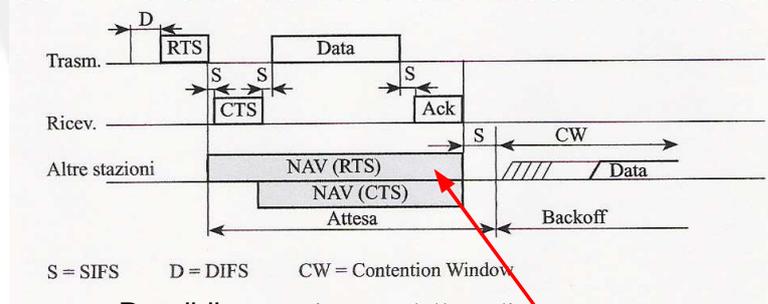


Modalità RTS/CTS

- Serve per risolvere il problema dell'hidden node
- Chi ha vinto la contesa trasmette un frame di Request to Send (RTS) al destinatario
- Il destinatario risponde con un frame di consenso Clear to Send (CTS)
 - RTS “avvisa” le stazioni vicine al TX della trasmissione imminente
 - CTS “avvisa” le stazioni vicine al RX della trasmissione imminente
- Tutte le stazioni che ascoltano RTS e CTS sanno per quanto tempo il canale rimarrà occupato e possono evitare di contendere

RTS/CTS e NAV

- Il contatore di attesa che le altre stazioni usano si chiama Network Allocation Vector



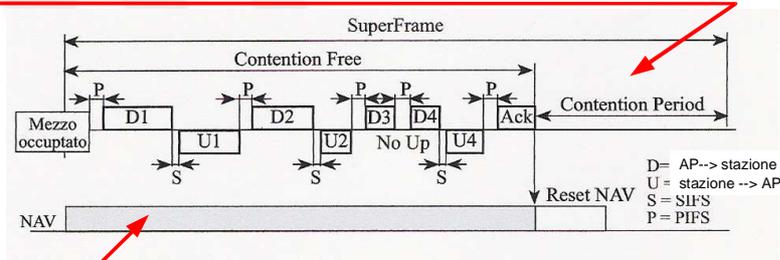
Possibile spegnimento della radio
per risparmiare energia

Point Coordination Function

- Può essere gestito solo dall'Access Point
- Polling dell'Access Point alle varie stazioni
- Accesso **deterministico** al canale
- Il tempo viene diviso in Superframe
- L'AP aspetta un intervallo PIFS dopo che il canale è libero per chiedere
 - Ha priorità su DCF ma non su Ack e CTS perché $SIFS < PIFS < DIFS$
 - Può coesistere con DCF per l'associazione di nuove stazioni

Struttura a Superframe e protocollo PCF

Il periodo con contese serve per far funzionare le stazioni che non usano PCF o per far entrare nuove stazioni



Il periodo senza contese è ottenuto caricando la sua lunghezza nel NAV

Sincronizzazione e associazione

- Sincronizzazione mediante beacon periodici inviati dall'Access Point (infrastructure) e da tutte le stazioni (ad-hoc)
- Associazione di una stazione
 - Passive scanning su tutti i canali
 - Active scanning:
 - Probe request con ESS-ID e BSS-ID della rete cercata
 - Probe response

Tipi di MAC-PDU

- Data PDU: simile all'Ethernet PDU
 - DMAC: 6 byte
 - SMAC: 6 byte
 - Length: 2 byte
 - FCS: 4 byte (CRC)
- Ack PDU
- RTS PDU
- CTS PDU
- Beacon PDU

802.15.X: Personal Area Network

- 802.15.1
 - Livello fisico e datalink del bluetooth
- 802.15.4
 - Livello fisico e datalink per reti a basso bitrate e basso consumo (wireless sensor network)

Bluetooth

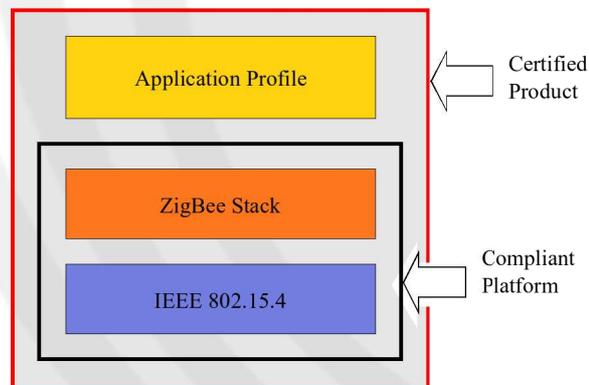
- Consorzio di aziende per creare prodotti interoperabili
- Ingloba IEEE 802.15.1 in un'architettura che arriva fino all'applicazione



What is ZigBee?

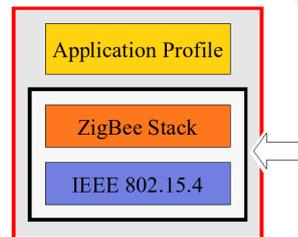
- A high level communication protocol using small, low-power digital radios based on the IEEE 802.15.4 standard for wireless networks
- ZigBee is targeted at applications that require a
 - Low device cost
 - Low data rate
 - Low power consumption (long battery life)
 - Secure networking

The ZigBee Product

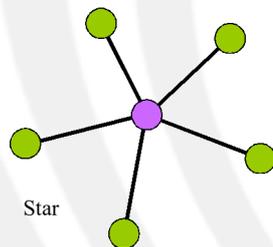


ZigBee Compliant Platform

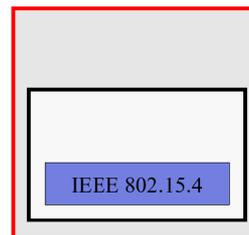
- Ensures all parts of the stack (other than the application) are compliant with the ZigBee standard
- Allows Network interoperability but does not imply interoperability at the application layer



From 802.15.4 ...

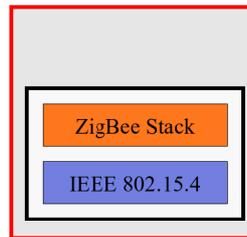
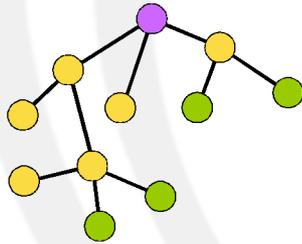


- 802.15.4 Coordinator
- 802.15.4 End Device



... to ZigBee

Cluster Tree

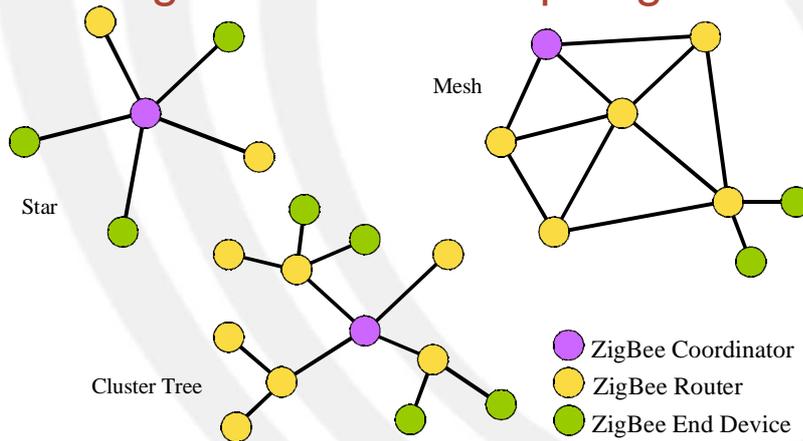


- 802.15.4 Coordinator → ZigBee Coordinator
- 802.15.4 Coordinator → ZigBee Router
- 802.15.4 End Device → ZigBee End Device

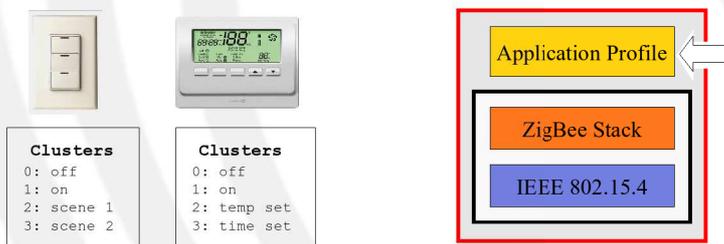
ZigBee Node Types

- **ZigBee Coordinator**
 - One required for each ZB network
 - Initiates network formation and stores information about the network
- **ZigBee Router**
 - Participates in routing of messages
- **ZigBee End Device**
 - Enables very low cost solutions

ZigBee Network Topologies

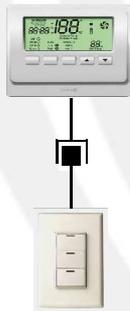


Application Profiles



- Application profiles define what messages are sent over the air for a given application
- Devices with the same application profiles interoperate end to end

Why Do We Need Profiles?



- Need a common language for exchanging data
- Need a well defined set of processing actions
- Interoperability across different manufacturers
- Simplicity and reliability for end users
- Consumer flexibility for products

Profile Classes

- Public Profiles
 - For generically useful applications
 - Developed publicly by members of the ZigBee Alliance
- Manufacturer specific profiles
 - For manufacturer specific proprietary applications
 - Developed privately by individual manufacturers
 - Must use a ZigBee allocated profile identifier

Home Automation Profile

- Management of lighting, heating and cooling system from anywhere in your home
- Automate control of multiple home systems to improve conservation, convenience and safety
- Embed intelligence to optimize consumption of natural resource
- Install, upgrade and network home control system without wires
- Easily install wireless sensors to monitor a wide variety of conditions
- Receive automatic notification upon detection of unusual events

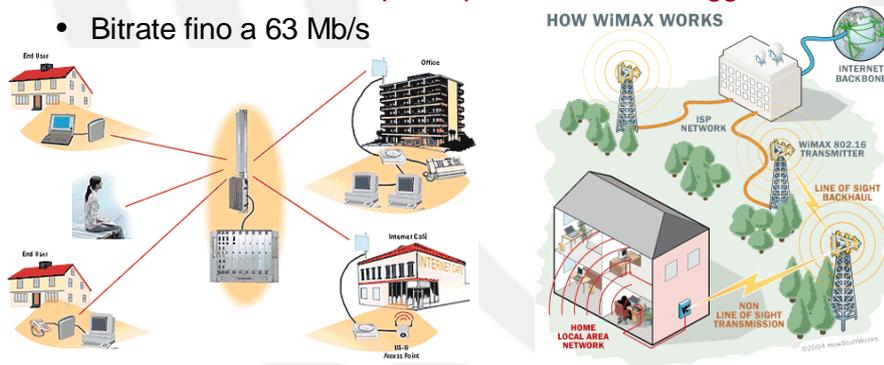


Home Automation Profile



802.16 (WiMax)

- Pensato per reti geografiche (Wireless Local Loop - WLL)
 - sostituzione ADSL per risparmiare sul cablaggio
- Bitrate fino a 63 Mb/s



Diffusione WiMax



Livelli di 802.16

- Livello fisico
 - Utilizzo di frequenze radio non libere tra 10 e 66 GHz
 - Modulazione adattiva basata sulla qualità del canale radio
 - Gestione degli errori del livello fisico
- Livello MAC
 - Modalità infrastructure (una specie di PCF)
 - Base station su un edificio o un traliccio
 - Subscriber station su edifici o dentro la camera
 - Full-duplex

Servizi offerti da 802.16

- Mobilità fino a 120 km/h
- Alta densità di stazioni
- Sicurezza: protezione e riservatezza
- Servizio connesso a livello MAC (unico esempio)
- Classi di traffico a priorità diversa:
 - Supporto per traffico a ritardo max limitato
 - Voice over IP (VoIP)