

Reti Wireless E Mobili

Massimo Perego

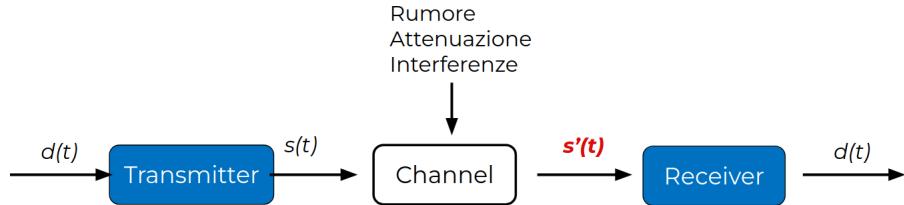
Contents

1 Principi di Teoria della Trasmissione	3
1.1 Rappresentazione dei segnali	4
1.2 Relazione tra Bandwidth e Data Rate	7
1.2.1 Teorema di Nyquist sulla banda	9
1.2.2 Decibel	11
1.2.3 Rapporto segnale rumore SNR	11
1.2.4 Shannon Capacity Formula	12
1.3 Multiplexing	14
1.3.1 Frequency Division Multiplexing FDM	14
1.3.2 Time division Multiplexing TDM	14
2 Comunicazione Wireless	15
2.1 Encoding, symbol e symbol rate	17
2.2 Trasmissione delle onde radio	18
2.2.1 Problemi con Trasmissione radio Line of Sight (LoS) .	19
2.3 Codifica e Trasmissione Dati	26
2.3.1 Modulazione e Codifica	26
2.3.2 Bit Error Rate Curve	29
2.3.3 Forward Error Correction	30
2.3.4 Orthogonal Frequency Division Multiplexing OFDM .	33
2.4 Spread Spectrum	35
2.4.1 Frequency Hopping Spread Spectrum FHSS	36
2.4.2 Direct Sequence Spread Spectrum DSSS	37
2.4.3 Code Division Multiple Access CDMA	38
3 Wireless Personal Area Network WPAN	41
3.1 ISM Band	41
3.2 Pulse Code Modulation PCM	41

3.3	802.15.x	42
3.4	Bluetooth	42
3.4.1	Architettura dei protocolli	43
3.4.2	Piconet & Scatternet	46
3.4.3	Bluetooth Radio	47
3.4.4	Baseband	50
3.4.5	Link Manager Protocol	53
3.4.6	Logical Link Control and Adaptation Protocol L2CAP	56
3.4.7	Service Discovery Protocol SDP	57
3.5	Bluetooth Low Energy BLE	58
3.5.1	Architettura	59
3.5.2	Classi di potenza	59
3.5.3	BLE Radio (PHY)	59
3.5.4	BLE State Machine	60
3.5.5	Advertising	61
3.5.6	Generic Attribute Profile GATT	61
3.5.7	General Access Protocol GAP	62
3.6	ZigBee	64
3.6.1	Livello Fisico 802.15.4 (PHY)	66
3.6.2	Livello Data Link 802.15.4 (MAC)	67
3.6.3	Livello di rete	73
3.6.4	ZigBee Device Object ZDO	73
3.7	Matter & Thread	74
4	Wireless Local Area Network WLAN	76
4.1	Sottolivello MAC	79
4.1.1	Distributed Coordination Function DCF	79
4.1.2	Problema del terminale nascosto	82
4.2	802.11 Con Infrastruttura	84
4.2.1	Point Coordination Function	85

1 Principi di Teoria della Trasmissione

Vogliamo **trasmettere informazioni** binarie su un **mezzo analogico**. Tipicamente abbiamo uno schema del tipo:



Si hanno dati nel tempo i quali passano da un **trasmettitore** il quale “traluce” i dati **digitali** in un segnale **analogico**, il quale può essere **trasmesso su un mezzo analogico** (e.g., aria, cavi, ecc.). Il segnale attraversa il mezzo e arriva a un ricevitore, il quale decodifica il segnale per tornare ai dati originali. Però, il canale non è perfetto o perfettamente affidabile, è possibile **introduca**:

- Il **rumore** in mezzi wireless può essere importante
- Il ricevitore deve essere in grado di recepire piccole quantità di potenza, in quanto il segnale potrebbe essere **attenuato**
- **Interferenze**, “casuali” dovute alla stessa tecnologia (propagazione del mezzo, ecc.) oppure volontarie (e.g., jamming).

Quindi il **segnale inviato** risulterà **diverso** dal **segnale ricevuto**, ma se il segnale viene strutturato correttamente ed è robusto a queste deformazioni il ricevitore sarà in grado di estrarre ugualmente dati dal segnale “modificato”. Quanto è facile ricostruire il segnale dipende da **quanto** i fenomeni di disturbo hanno **modificato** il segnale, può pure non essere ricostruibile.

Per **segnaile**

- **analogico**: si intende una variazione continua, senza interruzioni o discontinuità
- **digitale**: un livello di segnale viene mantenuto costante per un determinato intervallo, con un cambio di livello rapido (quasi istantaneo)

Vogliamo passare da una forma d’onda all’altra (trasmettitore e ricevitore fanno questo).

1.1 Rappresentazione dei segnali

Dominio del tempo: Un segnale può essere visto nel dominio del tempo come un **segnale periodico sinusoidale**

$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \phi)$$

Dove:

- **Aampiezza** (A): massimo livello o forza del segnale nel tempo (Volt)
- **Frequenza** (f): Numero di cicli al secondo (Hz)
- **Fase** (ϕ): posizione relativa all'interno del periodo
- **Periodo** (T): tempo impiegato per un ciclo ($1/f$)
- **Lunghezza d'onda** (λ): distanza occupata da un singolo ciclo: $\lambda = c/f$ oppure $\lambda = Tc$ dove $c = 3 \cdot 10^8$ m/s

La variazione di ampiezza, fase e frequenza vengono usate per codificare le informazioni (e.g., radio AM e FM, modulazione di fase non per le radio, ma alter cose).

Dominio delle frequenze: Possiamo considerare un'onda elettromagnetica guardandola nel tempo, ma anche nel dominio delle frequenze. **Ogni segnale** (ragionevolmente periodico) **può essere scomposto da una serie di segnali periodici** (onde seno e coseno) con ampiezza, frequenza e fase differenti: trasformata di Fourier

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

Dove:

- $f = 1/T$: frequenza **fondamentale** ($n = 1$)
- a_n, b_n : **ampiezza** delle **singole componenti**, dette armoniche
- c : costante che rappresenta il **valore medio** del **segnale**

Possiamo **scomporre** un segnale in **diverse armoniche**, ognuna con il suo “contributo” rispetto al segnale originale. Questa è la serie di Fourier discreta, in un calcolatore saranno un numero finito di frequenze e la versione originale era con gli integrali, nel continuo.

Insomma, serve per passare da un dominio all'altro.

Cosa ci interessa: Dal punto di vista di un ricevitore, il quale riceverà tali segnali, ci interessa capire **com'è composta l'onda** a partire **da un'osservazione nel tempo** di quest'onda. Come faccio a **risalire alle componenti** a partire da un'osservazione nel tempo della forma d'onda? Le domande sono:

1. Come si fa a **determinare le ampiezze** di ciascuna componente
2. Con quale **frequenza campionare il segnale?** Il mondo digitale è discreto per definizione, in che punti della curva bisogna "leggere" per poter ricostruire l'onda in maniera precisa

Teorema del campionamento di Shannon: La **frequenza di campionamento** deve essere almeno il **doppio della frequenza massima del segnale** in ingresso.

Sapendo la frequenza massima (e tra ricevitore e trasmettitore ci si mette d'accordo), devo campionare ad almeno il doppio per evitare perdita di dati.

Passaggi di dominio: Per passare da un dominio all'altro abbiamo due algoritmi:

- **Fast Fourier Transform FFT:** da tempo a frequenze, passandogli la forma d'onda nel tempo restituisce le componenti
- **Inverse Fast Fourier Transform IFFT:** da frequenze a tempo, partendo dalle componenti restituisce la forma d'onda

Con "componenti" si intende i coefficienti a_n e b_n viste nella serie di Fourier. Questi algoritmi sono semplici, vengono implementati tramite hardware nei dispositivi, i quali devono effettuarle costantemente.

Assegnando dei bit al fingerprint di una forma d'onda (valori della trasformata), posso creare una lookup table per trovare il "significato" di una forma d'onda a partire dalla sua trasformata (osservo l'onda, faccio la trasformata, lookup per il significato).

Nel dominio delle frequenze: quando **tutte le frequenze** sono **multipli interi di una frequenza base**:

- $f = \text{frequenza fondamentale}$
- $kf = \text{armonica}$ ($k > 1$)

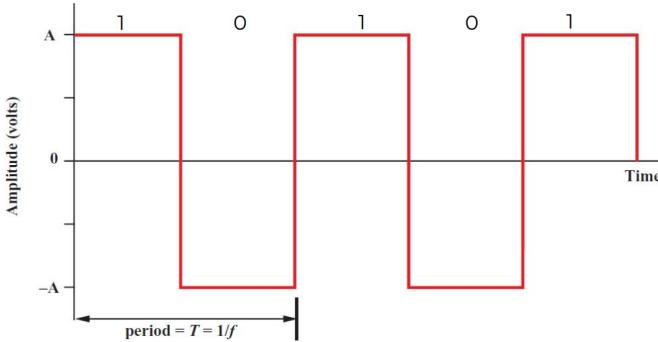
Periodo: Il periodo di $s(t)$ è il periodo della frequenza fondamentale ($T = 1/f$).

Spettro: Lo spettro del segnale è il range di frequenze che lo contiene (da dove a dove vanno le frequenze).

Banda: Absolute bandwidth è l'ampiezza dello spettro (“larghezza” dello spettro).

1.2 Relazione tra Bandwidth e Data Rate

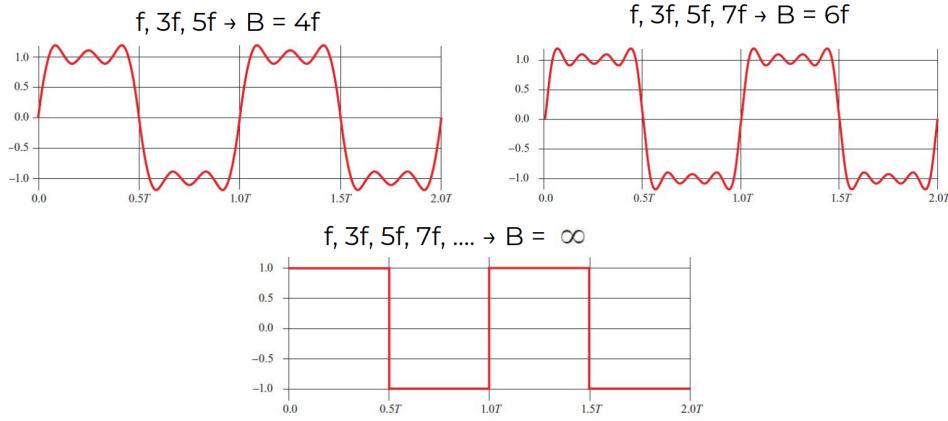
Esempio: vogliamo trasmettere un'onda quadra come **composizione finita di onde sinusoidali**. Esempio:



Trasmettiamo 2 bit per ogni periodo, ovvero un data rate di 2 bit. Possiamo avere una **sommatoria infinita** di onde **sinusoidali**:

$$s(t) = A \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{k \text{ odd}, k=1}^{\infty} \frac{\sin(2\pi k f t)}{k}$$

Ma questo richiederebbe una banda infinita, il che è difficile, quindi possiamo **ridurre lo spettro** per ottenere un'**approssimazione**:



Nel primo esempio una banda di $4f$ che va da f a $5f$, nel secondo aumentiamo la banda a $6f$, migliorando l'approssimazione. Con la banda che tende all'infinito otteniamo l'onda originale.

Con una certa banda, **quanti dati possiamo trasmettere?** Esempio:

Freq. fondamentale (f)	1 MHz	2 MHz
Spettro	1 Mhz - 5 Mhz	2 Mhz - 10 Mhz
Periodo (T)	$1 \mu s$	$0.5 \mu s$
Durata di 1 bit	$0.5 \mu s$	$0.25 \mu s$
Bandwidth (B)	$4 \text{ Mhz} (5f - f)$	$8 \text{ Mhz} (2(5f - f))$
Data rate (bps)	$2 \text{ Mbps} (2 \text{ bit}/\mu s)$	$4 \text{ Mbps} (4 \text{ bit}/\mu s)$

Con il doppio della banda abbiamo raddoppiato il data rate.

Capacità del canale: Quanti bit possiamo trasmettere sul canale senza perdere informazioni?

- **Channel capacity:** massimo bit rate alla quale è possibile trasmettere dati su un canale di comunicazione in determinate condizioni
- **Noise:** segnale NON voluto che si combina al segnale trasmesso, distorcendolo
- **Error rate:** tasso di errore (bit error rate), quante volte viene modificato involontariamente il segnale

Come possiamo trasmettere la **stessa quantità di informazioni senza usare più banda?** La soluzione è **ridurre il numero di armoniche**, semplificando la forma d'onda e peggiorando l'approssimazione. Questo si può fare finché l'onda non è un'approssimazione “troppo approssimata” (deve essere distinguibile).

Considerazioni: Vogliamo trasmettere una banda infinita con banda finita, ma una banda minore porta a distorsione maggiore. Una soluzione potrebbe essere scegliere la banda finita più ampia; sarebbe fattibile ma ci sono costi economici (i.e., la banda non è gratis) e il dispositivo deve essere in grado di gestirla. Inoltre può creare rumore aggiuntivo.

1.2.1 Teorema di Nyquist sulla banda

Dato un canale noise-free (ideale) la bandwidth limita il data-rate. Il **limite della quantità di informazioni** (misurata in bit/secondo e multipli) è limitato da due volte la banda

$$C = 2B$$

per **segnali binari** (2 livelli di voltaggio). Per **segnali multilivello**, codificare i dati su più livelli di segnale

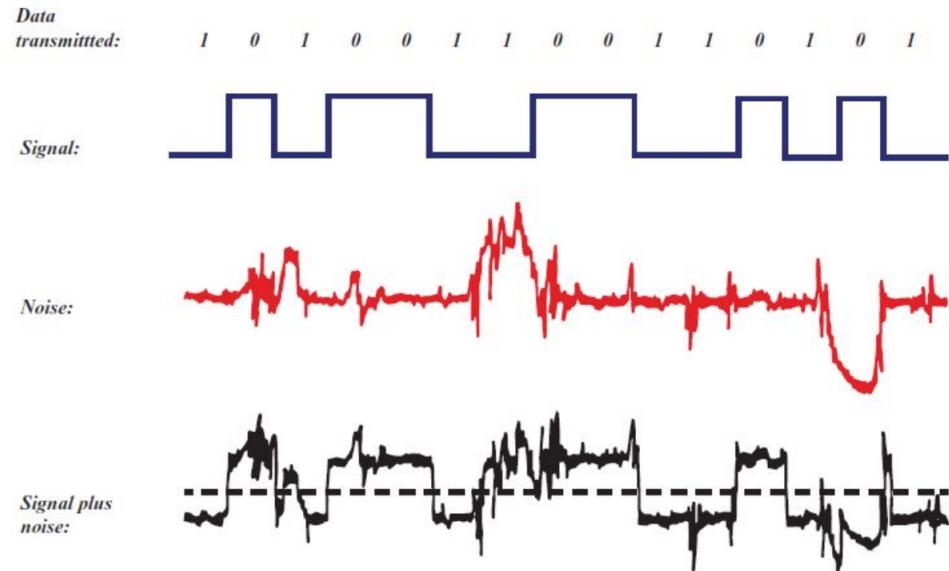
$$C = 2B \log_2 M$$

Dove M è il numero di livelli.

La **capacità del canale aumenta con il numero di possibili livelli** in cui codificare il segnale, modificando uno dei parametri (ampiezza, frequenza, fase). Il numero di livelli di segnale aumenta il numero di bit che si possono trasmettere con ogni trasmissione: con 2 valori trasmettiamo 1 bit, con 8 possibili valori possiamo trasmettere 3 bit alla volta.

Questo possibile solo se non c'è rumore, il massimo possibile. Tenendo il considerazione il rumore la capacità si abbassa.

Esempio di effetto del rumore sul segnale trasmesso:



Considerando il profilo temporaneo del rumore, il ricevitore riceve un segnale diverso, con modifiche su cui non abbiamo controllo, indipendenti da ricevitore e trasmettitore.

Tipi di rumore:

- Thermal noise: rumore di base dovuto all'agitazione delle molecole, un rumore bianco costante su tutta la banda
- Intermodulation noise: determinato dal fatto che ci sono dei problemi tra le diverse modulazioni, ci si "accavalla" nel trasmettere le informazioni
- Cross talk: cavi vicini che alterano il segnale l'uno dell'altro, tramite radiazioni elettromagnetico
- Impulse noise: impulso elettromagnetico intenso di durata limitata che attraverso il mezzo e distrugge temporaneamente il segnale

1.2.2 Decibel

Il decibel è un'**unità di misura del rapporto di potenze**, in scala **logaritmica**

$$\left(\frac{P_1}{P_2} \right)_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

± 3 corrispondono al doppio/metà.

Decibel-Milliwatt: Un decibel ma con la **potenza al denominatore fissata** ad $1mW$

$$P_{dBm} = \frac{P}{1mW}$$

Generalmente una Wireless-LAN (WiFi 802.11) usa $100mW$, quindi $20dBm$, mentre, una trasmissione cellulare usa $500mW$, quindi $27dBm$ (ricorda di mettere dopo il $10 \log_{10}$). In generale, una lettera dopo dB indica una potenza fissata al denominatore.

1.2.3 Rapporto segnale rumore SNR

Dobbiamo essere un grado di **quantificare il rumore** su un canale, quindi l'impatto sul rumore della trasmissione.

$$(SNR)_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\text{signal power}}{\text{noise power}}$$

Misurato in decibel (rapporto tra due potenze), tanto più il rapporto è alto, tanto più il segnale si distingue dal rumore.

1.2.4 Shannon Capacity Formula

Nyquist descrive la capacità del canale nel caso di assenza di rumore, Shannon dice che la **capacità dipende** non solo dalla capacità di codificare livelli ma **anche dal SNR**

$$C = B \log_2(1 + SNR)$$

Quindi la capacità è direttamente proporzionale al SNR. Questo valore è puramente teorico e **considera solo il thermal noise**, ma fornisce una **massima teorica per trasmettere informazioni senza errori** su un canale. La teoria della trasmissione di Shannon ha come assioma una trasmissione senza errori.

In una determinata condizione di rumore (SNR) possiamo aumentare il data rate in due modi:

1. Aumentando la bandwidth (B), ma il rumore termico aumenta con la larghezza della banda
2. Aumentando la potenza del segnale trasmesso (quindi aumentando il valore del SNR), ma un aumento della potenza porta ad aumentare intermodulation e crosstalk noise (aumenta il campo elettromagnetico)

Posso aumentare SNR o B ed in entrambi i casi l'aumento viene "bilanciato" da un aumento del rumore.

Esempio: Supponiamo di avere a disposizione uno spettro tra $3MHz$ e $4MHz$ e $SNR_{dB} = 24dB$:

$$\begin{aligned} B &= 4MHz - 3MHz = 1MHz \\ SNR_{dB} &= 24dB = 10 \log_{10}(SNR) \\ \implies SNR &= 251 \end{aligned}$$

Il valore di SNR significa che il segnale è circa 251 volte superiore al rumore.
Ora possiamo calcolare la capacità secondo Shannon:

$$C = 10^6 \cdot \log_2(1 + 251) \approx 10^6 \cdot 8 = 8Mbps$$

E da questa possiamo trovare quanti livelli di segnale servono per ottenere $8Mbps$, tramite la formula della capacità secondo Nyquist:

$$\begin{aligned} C &= 2B \log_2(M) \implies 8 \cdot 10^6 &= 2 \cdot 10^6 \cdot \log_2(M) \\ &\implies 4 &= \log_2(M) \\ &\implies M &= 16 \end{aligned}$$

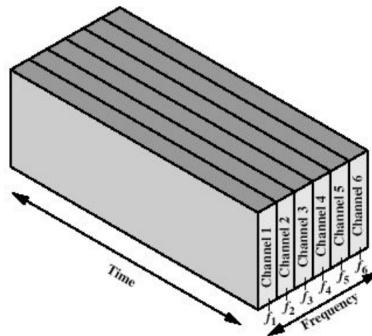
Di più di 16 sarebbe inutile perché trasmettendo un numero maggiore di livelli non possiamo superare la capacità teorica detta da Shannon. La capacità dipende dalla condizione del canale e dal numero di livelli.

1.3 Multiplexing

L'idea è quella di un collegamento che può trasportare più canali. Solitamente la capacità di un mezzo è superiore della capacità richiesta da una singola trasmissione quindi cerchiamo un modo di trasportare più segnali sullo stesso link.

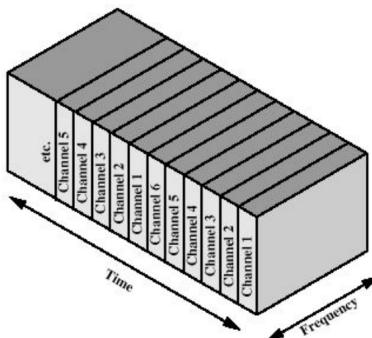
1.3.1 Frequency Division Multiplexing FDM

Se ho una banda "larga", posso dividerla in "slot" per ottenere sotto-bande con comunicazioni diverse, sfruttando il fatto che il segnale da trasmettere richiede una banda minore di quella disponibile. Creiamo n canali paralleli all'interno della banda.



1.3.2 Time division Multiplexing TDM

Se la banda è "piccola", ma il data rate è molto superiore a quello richiesto da una singola trasmissione, crea n slot di tempo ciclici.



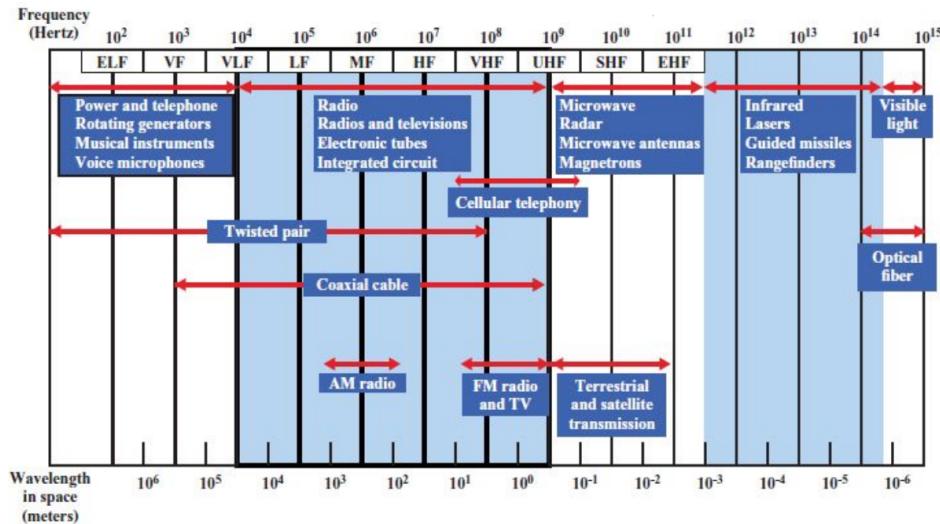
2 Comunicazione Wireless

Tutte le comunicazioni nel mondo wired avvengono tipicamente in banda base, i.e., data una banda B trasmetto direttamente usando lo spettro di frequenze $[0, B]$.

Problemi:

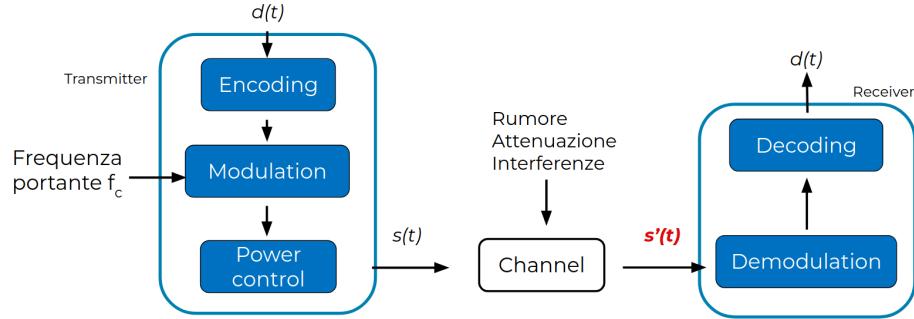
1. Se tutti i dispositivi trasmettessero in banda base, tutte le comunicazioni radio farebbero interferenza l'una con l'altra
2. Più è bassa la frequenza più grande deve essere l'antenna ($\lambda/2$ per antenna dipole, es: $1MHz \sim 142$ metri, $2100MHz \sim 7$ cm)
3. Ogni range di radio frequenze possiede diverse proprietà i propagazione e attenuazione

Spettro elettromagnetico per le telecomunicazioni:



Molto approssimativo, c'è uno standard per ogni tipo di telecomunicazione (allocazione delle frequenze per gli USA).

Trasmissione in banda traslata: Da $[0, B]$ spostiamo la banda all'interno di un altro range, ovvero $[f_c - B/2, f_c + B/2]$, la stessa banda ma traslata attorno ad una frequenza portante f_c .



Il compito del trasmettitore diventa codificare, **modulare attorno alla frequenza portante f_c** ed il trasmettitore deve de-modulare, pulire e de-codificare il segnale trasmesso. Bandwidth e data rate rimangono gli stessi, cambia solo “dov’è” la banda.

Domande:

1. Che spettro utilizzare? (che frequenza portante scegliere)
2. Come codifico i dati? (da digitale ad analogico)
3. Come modulo il mio segnale in banda base sulla frequenza portante?

2.1 Encoding, symbol e symbol rate

Simbolo: Una forma d'onda, uno stato o una condizione significativa del canale di comunicazione che persiste per un intervallo di tempo fissato. Esempio: voltaggio a 3V per 1 secondo.

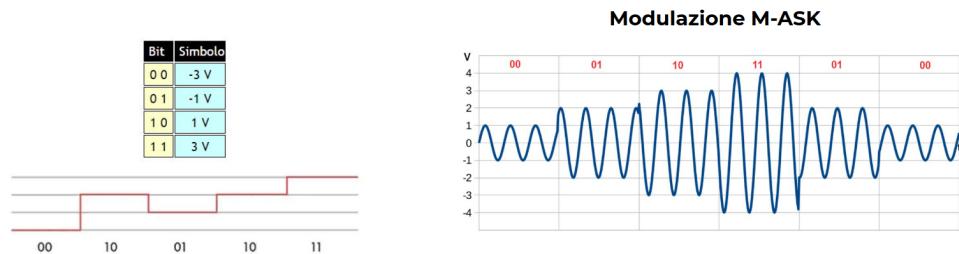
Symbol rate: Quantità di simboli trasmessi al secondo (misurato in baud). Dipende dal processore fisico.

In generale, un **simbolo può contenere più bit** (codifica e modulazione), quindi **symbol rate \neq bit rate**.

Generalmente, più la distanza da coprire si allunga più la durata si abbassa.

Una data bandwidth può supportare diversi data rate, a seconda dell'abilità del ricevente di distinguere 0 e 1 in presenza di rumore.

Possiamo codificare tramite una modulazione in ampiezza: data una entry di bit scegliamo il voltaggio corrispondente



Moduliamo la portante (modifichiamo l'ampiezza) in base ai bit da codificare. Usato nelle radio AM. Si può vedere che symbol rate e data rate sono diversi, ogni simbolo (livello di ampiezza) rappresenta due bit.

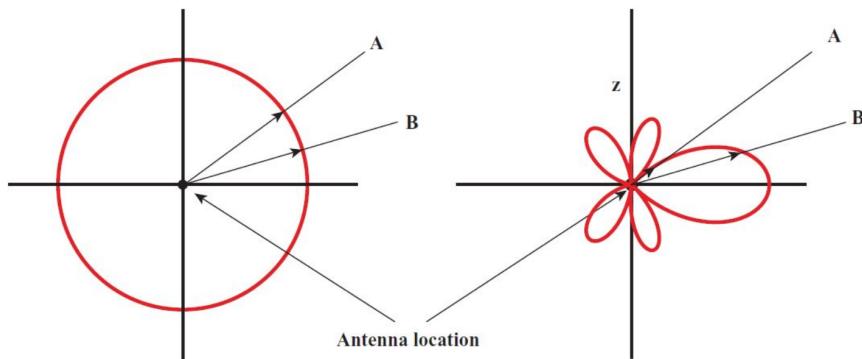
2.2 Trasmissione delle onde radio

Propagazione onde radio: Ci sono più possibili tipi di propagazione delle onde radio, in base alla frequenza utilizzata

- Ground Wave Propagation (sotto i $2MHz$): il segnale segue la curvatura della terra
- Sky Wave Propagation (da 2 a $30MHz$): il segnale rimbalza nella ionosfera
- **Line of Sight LoS** (sopra $30MHz$): Deve esserci una linea diretta (anche non a vista in realtà, ma diretta) tra trasmettitore e ricevitore

Tipi di antenne:

- Omnidirezionale (a sinistra), la potenza emessa è uguale in tutte le direzioni (ideale)
- Direzionale (a destra): si vuole propagare segnale in una sola direzione, non ideale, ma solitamente la propagazione non è limitata strettamente ad una direzione



2.2.1 Problemi con Trasmissione radio Line of Sight (LoS)

Ci sono problemi legati alla trasmissione LoS:

- Free space loss & path loss: attenuazione del segnale dovuta alla distanza e all'ambiente in cui il segnale si propaga; cosa perdo da antenna trasmettitrice (TX) a ricevitrice (RX)
- Rumore: disturbo che può distorcere il segnale
- Multipath: il segnale tra TX e RX può subire riflessioni, diffrazioni e scattering causando la ricezione di più onde elettromagnetiche dello stesso segnale in tempi diversi; per qualche motivo, un riflesso del segnale giunge al ricevitore, in momenti diversi dall'originale, possono diventare interferenze per segnali successivi
- Effetto Doppler: Il segnale cambia a causa del movimento di RT, TX e ostacoli; il segnale ricevuto potrebbe essere su una frequenza "vicina" a quella originale, disturbando la fingerprint di un segnale

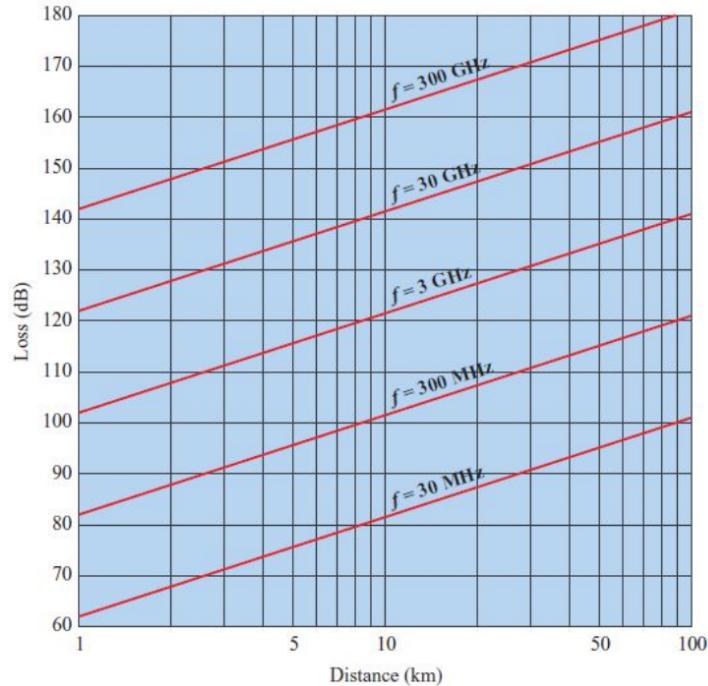
Path Loss: Attenuazione del segnale radio in funzione della distanza tra trasmettitore e ricevitore.

$$\frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 d^n = \left(\frac{4\pi f}{c} \right)^2 d^n$$

Misurata in dB , rapporto tra potenza del segnale trasmesso (fisso) rispetto alla potenza del segnale ricevuto (diventa sempre più piccolo, in base alla distanza).

Direttamente proporzionale (al quadrato della) alla frequenza, direttamente proporzionale ad una potenza della distanza, l'esponente n dipende dall'ambiente (più l'ambiente è ostruito più la distanza sarà influente).

Free space loss ($n = 2$): A parità di distanza, maggiore è la frequenza maggiore è il path loss. La potenza di trasmissione massima è regolamentata (standard). A parità di potenza, maggiore è la frequenza minore è il raggio di copertura. Con “free space loss” si intende la perdita ideale in caso di spazio completamente libero, quindi con $d^n = d^2$.



Con $300GHz$ la perdita ad 1km è oltre i $140db$, mentre con $30MHz$ è poco sopra i $60dB$. La distanza di trasmissione è limitata dalle frequenze utilizzate da una certa tecnologia.

Antenna gain: La diffusione di un’antenna ideale è isotropica (in tutte le direzioni), ma questo può essere inefficiente, capendo la posizione dei ricevitori si può migliorare la potenza ricevuta. L’idea di un’antenna direzionale è convogliare l’energia verso un determinato punto, un “beam” verso il ricevitore. Il segnale si propaga in una ellisse verso la direzione voluta dall’antenna, al contrario del cerchio creato da un’antenna isotropica.

Il **gain** di un’antenna viene definito come il rapporto tra l’intensità della radiazione elettromagnetica in una data direzione e l’intensità che si avrebbe se si usasse un’antenna isotropica, misurato in dB_i . La direzionalità viene misurata in dB_i , dove i sta per “isotropic”, ed è il rapporto tra la potenza che si avrebbe in quel punto con una antenna isotropica al denominatore e l’antenna attuale al numeratore. Concentrando verso il ricevitore “perdo” verso le altre direzioni.

Questo ha un **effetto sul path loss**; nel caso ideale avremmo allineamento perfetto tra TX e RX e di conseguenza un gain che riduce la perdita di potenza nella trasmissione.

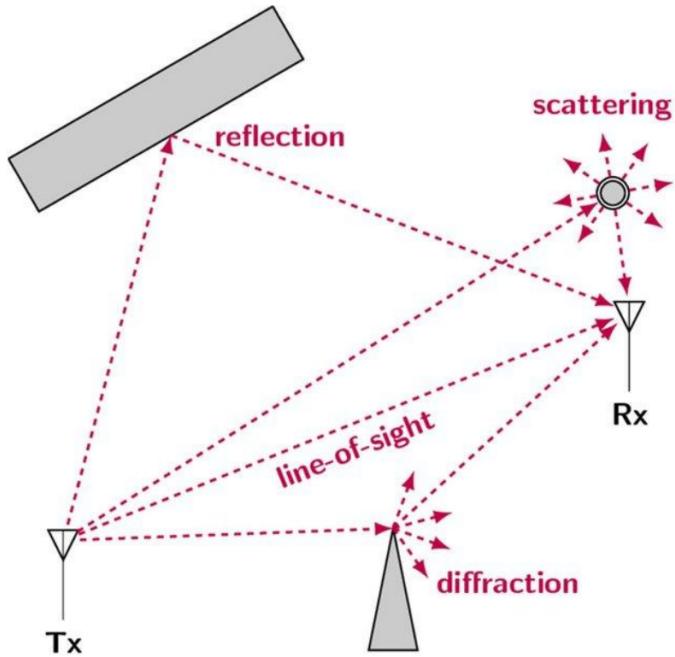
Alla perdita in free space, si sottraggono valori dipendenti dal gain di trasmittente e ricevente, abbassando il rapporto e riducendo la perdita. Chiamando G_{tx} e G_{rx} gain di trasmittitore e ricevitore, rispettivamente:

$$\frac{P_t}{P_r} = \frac{(4\pi f)^2}{G_{tx}G_{rx}c^2} d^n$$

Da ricordare che è necessaria un allineamento, se il ricevitore è fuori dal “beam” allora la potenza ricevuta sarà minore di quella di un’antenna isotropica, a parità di distanza (dB_i negativi, il gain peggiora).

Multipath: Anche se direzionale, il segnale avrà una “fascia” di direzioni in cui viene inviato, quindi può interagire con l’ambiente:

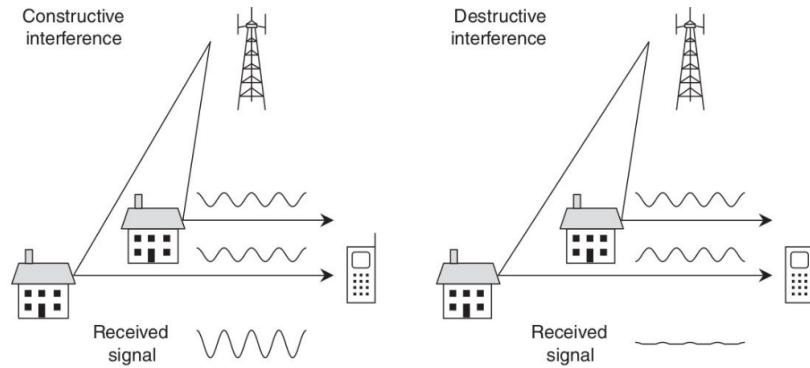
- **riflessione:** il segnale “rimbalza”, come su uno specchio,
- **scattering:** quando la lunghezza d’onda λ è simile a quella dell’oggetto, un raggio colpisce l’elemento e viene separato in tanti altri, sparsi in tutte le direzioni
- **diffrazione:** se la lunghezza d’onda è $\lambda \ll$ della dimensione di un oggetto e lo colpisce sui bordi, diffondendo il segnale in più direzioni dall’altro lato dell’oggetto



I percorsi che non sono LoS saranno più lunghi e, di conseguenza, più lenti.

Fading: Quando più segnali vengono ricevuti in tempi diversi ci sono due tipi di interferenze:

- **costruttiva:** “fa bene”, aumenta l’ampiezza ed il segnale
- **distruttiva:** il segnale ricevuto viene modificato in modo imprevedibile (fading/evanescenza)



Bisogna tenere conto delle proprietà fisiche del mezzo, quindi da come il segnale si modifica durante la propagazione. Il **Coherence time** permette di avere una stima per sapere ogni quanto campionare la condizione di un canale, un lasso di tempo in cui essere sicuri che il canale non subirà cambiamenti significativi; scala temporale in cui le caratteristiche del segnale sono “costanti”

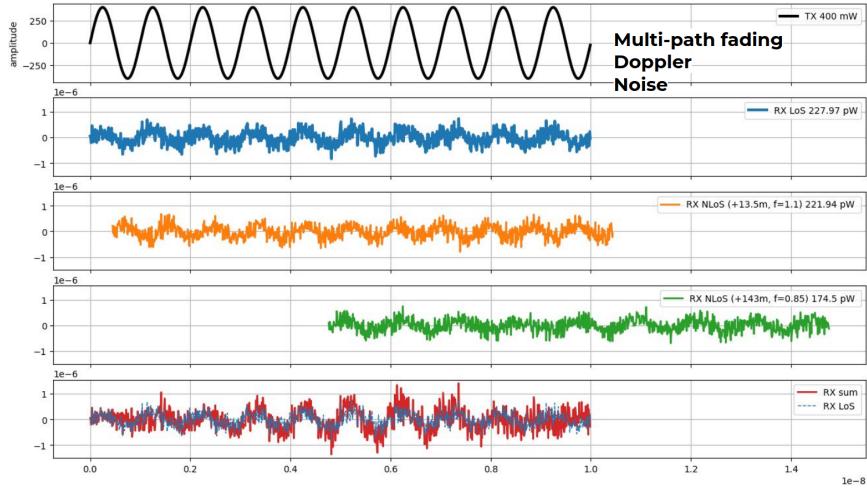
$$T_c = \frac{1}{f_D}$$

Dove f_D è la **frequenza di Doppler**: dipende dalla velocità di movimento tra trasmettitore e ricevitore e dalla frequenza (e velocità della luce); più alta è la frequenza o più velocemente ci muoviamo più il campionamento dovrà essere fitto

$$f_D = \frac{v}{c} f_c$$

Una tecnologia pensata per determinati spettri ed una determinata velocità relativa possiamo determinare una stima di T_c e costruire apparati che funzionano di conseguenza.

Esempio:

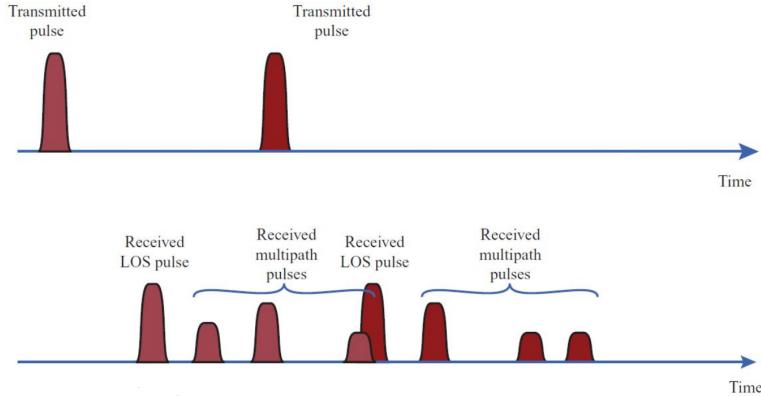


I primi 4 grafici sono:

- segnale trasmesso
- segnale ricevuto LoS, in pW , con effetto Doppler e noise
- altri 2 segnali NLoS (Non Line of Sight), percorrono più spazio, vengono ricevute dopo nel tempo e con una potenza ridotta, oltre che subire effetto Doppler e noise

L'ultima è ciò che viene effettivamente ricevuto, ovvero la combinazione di tutte le onde ricevute. E questo solo con il multipath, bisogna aggiungere anche effetto doppler e noise.

Inter-Symbol Interference: La lunghezza dei vari simboli deve tenere conto degli effetti del multipath.

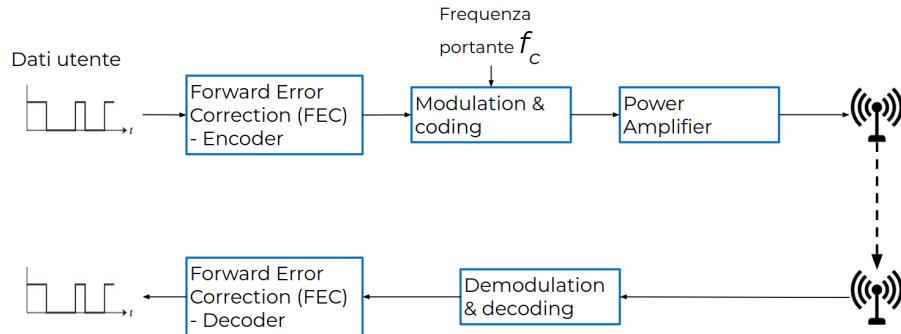


Dopo il primo impulso LoS, vengono ricevuti altri simboli per effetto del multipath e ci possono essere altri segnali che interferiscono con l'impulso LoS successivo. Si sovrappongono segnali LoS e multipath di quello precedente, causando interferenza distruttiva, interferenza inter-simbolo ISI. La distanza tra un segnale e l'altro è troppo breve.

Maggiore è la distanza tra TX e RX, più alta è la probabilità di questi fenomeni. Trasmettendo meno simboli ho un data rate minore, ma incrementandoli aumenta la probabilità di avere ISI.

2.3 Codifica e Trasmissione Dati

La struttura di una trasmissione radio è



Le fasi sono:

- Forward Error Correction FEC
- Modulazione e encoding
- Si amplifica la potenza in modo da renderla sufficiente (secondo il path loss previsto), deve essere in grado di raggiungere il RX
- il segnale “brutto” ricevuto va demodulato e decodificato
- FEC sul decoder

2.3.1 Modulazione e Codifica

Per la codifica possiamo agire sui 3 parametri di una sinusoidale:

- **Amplitude Shift Keying ASK:** diversi livelli di ampiezza per diversi bit
- **Frequency Shift Keying FSK:** diverse frequenze per diversi bit
- **Phase Shift Keying PSK:** diverse fasi per diversi bit

Ci possono anche essere combinazioni. L'obiettivo della parte di encoding e modulation è produrre una forma d'onda con un determinato significato.

Differential Phase-Shift Keying (DPSK): Risulta più semplice accorgersi della differenza rispetto che misurare un certo livello: la codifica dipende dallo stato precedente:

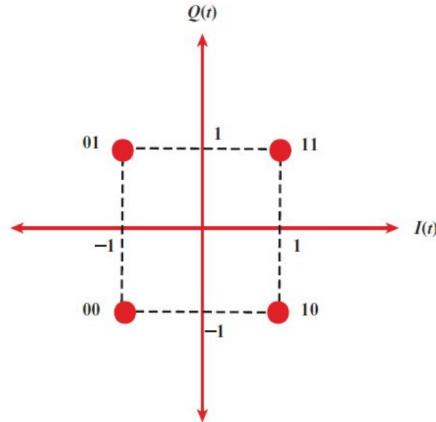
- 0 → nessun cambio di fase
- 1 → applico uno shift

Richiede un allineamento meno preciso tra TX e RX, identificare le differenze è più semplice. Codifica e decodifica non sono più fisse ma dipendono dalla variazione tra un bit ed il successivo (o mancanza di essa).

Quadrature Phase-Shift Keying QPSK: Viene utilizzata la fase per determinare i bit. Ci sono 4 fasi differenti (90° tra una e l'altra), quindi 2 bit per simbolo

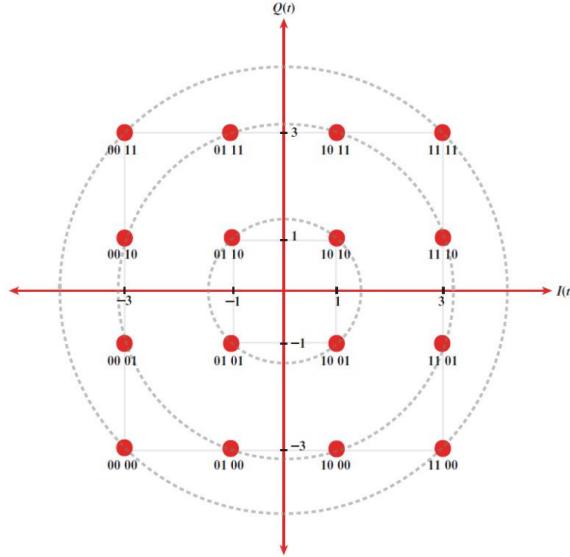
$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_{ct} t + \frac{\pi}{4}) & 11 \\ A \cos(2\pi f_{ct} t + \frac{3\pi}{4}) & 01 \\ A \cos(2\pi f_{ct} t - \frac{3\pi}{4}) & 00 \\ A \cos(2\pi f_{ct} t - \frac{\pi}{4}) & 10 \end{cases}$$

Si usa la codifica Gray, punti adiacenti differiscono di un solo bit. Diagramma della costellazione:

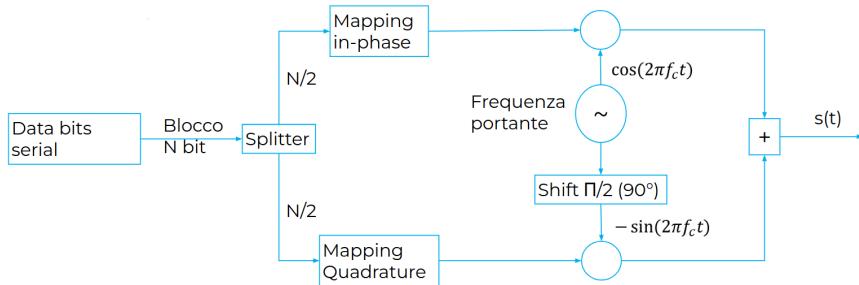


Si può vedere che ci sono 4 “posizioni”, ognuna delle quali codifica 2 bit. Si chiama “quadra” per la variazione di 90° tra uno e l'altro. Qua abbiamo 2 bit per symbol.

Quadrature Amplitude Modulation QAM: Oltre alla fase abbiamo anche una modifica dell'ampiezza. Utilizziamo due parametri per avere più codifiche differenti, portando ad una costellazione più densa. Combina variazioni di ampiezza e fase.



Schema QAM:



Si spezzano i bit, si mappa prima in fase e poi in ampiezza, si modula sulla portante e le sinusoidi risultanti si uniscono per avere il segnale modulato da trasmettere.

Wi-Fi 5 usa 256-QAM mentre Wi-Fi 6 usa 1024-QAM. La potenza rimane costante, ci muoviamo all'interno dello stesso spazio, quello che cambia è quanto "densi" sono i simboli all'interno dello spazio.

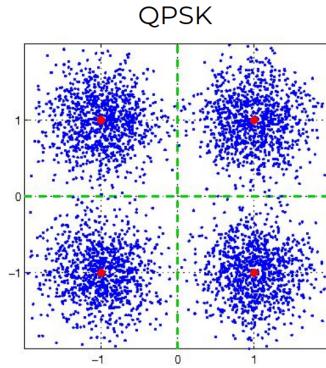
2.3.2 Bit Error Rate Curve

Rappresenta la **probabilità che un bit venga alterato**, in funzione del rapporto tra la densità di energia del segnale per bit ed il livello di rumore

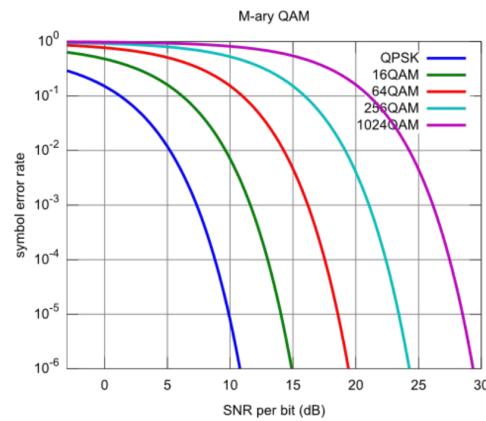
$$BER = func = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)$$

Qual'è la probabilità di sbagliare un bit, dato un certo rapporto tra densità di energia del segnale per bit e rumore. Simile a SNR come idea.

Dei valori ricevuti da un trasmettitore potrebbero essere:



Il RX riceve una “nuvola” di punti e cerca il simbolo più vicino ma se l’alterazione subita è significativa potrebbe essere un’interpretazione sbagliata quindi un errore. Man mano che il segnale migliora rispetto al rumore, la probabilità di avere un errore diminuisce. Tanto più densa è la costellazione tanto è più probabile sbagliare simbolo:



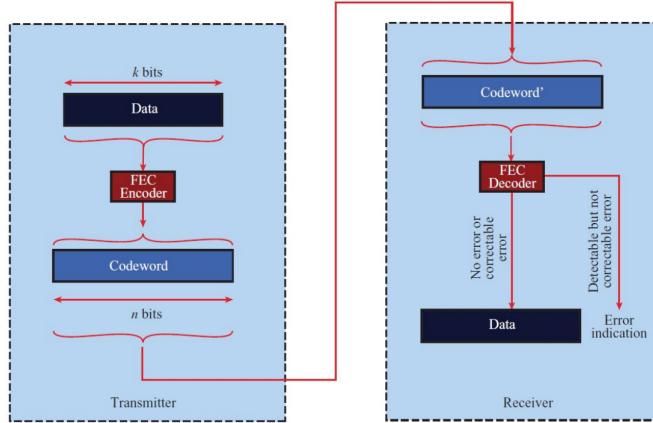
Si può vedere come QPSK sbagli molto meno rispetto a 1024-QAM.

Adaptive Modulation and Coding AMC: Misuriamo la qualità del canale e cerchiamo di capire quale sia la codifica più efficiente, troppi errori renderebbero la comunicazione effettivamente inutile. Se il SNR è 10 è inutile trasmettere con 1024-QAM in quanto quasi tutti i simboli saranno sbagliati (immagine precedente), è meglio inviare con un data rate minore che permette meno errori.

La **codifica viene modificata in base alla qualità del canale**, ogni tot di tempo misuro la qualità del canale ed adatto il data rate di conseguenza.

2.3.3 Forward Error Correction

Servono delle tecniche di correzione dell'errore. Dato che nel wireless la probabilità di errore è elevata, viene aggiunta una ridondanza ai dati inviati: ogni sequenza di bit diventa una codeword, abbiamo k bit trasmessi per n bit da inviare (sempre $k > n$). In questo modo, con una tabella di codeword adatta, è possibile rendere la trasmissione resiliente agli errori.



Ogni n bit da trasmettere diventano k , secondo una tabella prefissata, così anche se qualcuno arriva sbagliato si può ricostruire il valore originale (esempio: $00 \rightarrow 00000$, $10 \rightarrow 11001$).

Rimangono valide le tecniche di error detection, in cui a livello di RX riusciamo a capire se c'è stato un errore tramite dei bit di controllo aggiunti ai dati (e.g., CNC).

AMC: A seconda delle condizioni del canale wireless il trasmittente sceglie lo schema di modulazione e codifica opportuno. Bisogna scegliere: codifica, coding rate (redundancy). Usato in reti mobili 4G, 5G e WiFi (802.11n+).

Generalmente, queste informazioni vengono scelte a partire da una tabella: se ho un SNR di questo tipo, che modulazione e coding rate (rapporto bit totali e di informazione effettiva) posso usare?

SNR (dB)	MCS index ^[i]	Modulation type	Coding rate	Modulation and coding schemes							
				Data rate (Mbit/s) ^[ii]							
				20 MHz channels		40 MHz channels		80 MHz channels		160 MHz channels	
5 dB	0	BPSK	1/2	1600 ns GI ^[iii]	800 ns GI	1600 ns GI	800 ns GI	1600 ns GI	800 ns GI	1600 ns GI	800 ns GI
		QPSK		8.6	16	17.2	33	34.4	68	72.1	136
10 dB	2	QPSK	3/4	24	25.8	49	51.6	102	108.1	204	216
		16-QAM		33	34.4	65	68.8	136	144.1	272	282
15 dB	4	16-QAM	3/4	49	51.6	98	103.2	204	216.2	408	432
		64-QAM		65	68.8	130	137.6	272	288.2	544	576
20 dB	6	64-QAM	3/4	73	77.4	146	154.9	306	324.4	613	649
		64-QAM		81	86.0	163	172.1	340	360.3	681	721
25 dB	8	256-QAM	3/4	98	103.2	195	206.5	408	432.4	817	865
		256-QAM		108	114.7	217	229.4	453	480.4	907	961
30 dB	10	1024-QAM	3/4	122	129.0	244	258.1	510	540.4	1021	1081
		1024-QAM		135	143.4	271	286.8	567	600.5	1134	1201

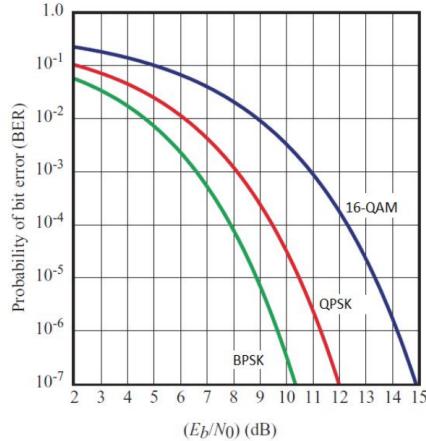
Esempio: Dati un SNR sul canale, un BER che si vuole garantire ed un symbol rate

$$SNR = 8dB, BER = 10^{-2}, SR = 1000sym/s$$

Che modulation and coding scheme posso usare sul mio canale per avere l'error rate desiderato, sapendo che il coding rate per ogni codifica è

SNR	Coding rate		
	BPSK	QPSK	16-QAM
< 6dB	0.6	0.4	0.2
6 – 10dB	0.8	0.6	0.5
> 10dB	0.9	0.8	0.7

Ed il BER per ogni codifica è



Dall'immagine si può vedere che con $SNR = 8dB$, sia BPSK che QPSK permettono un BER adeguato. Quale dei due però permette il data rate migliore? Possiamo calcolare il data rate come

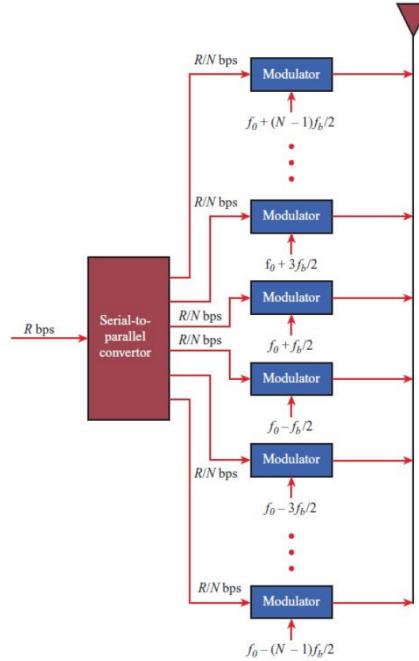
$$sym/s \cdot bit/sym \cdot coding_rate$$

Quindi

- BPSK: con coding rate di 0.8 ed 1bps: $1000 \cdot 1 \cdot 0.8 = 800bit/s$
- QPSK: con coding rate di 0.6 e 2bps: $1000 \cdot 2 \cdot 0.6 = 1200bit/s$

2.3.4 Orthogonal Frequency Division Multiplexing OFDM

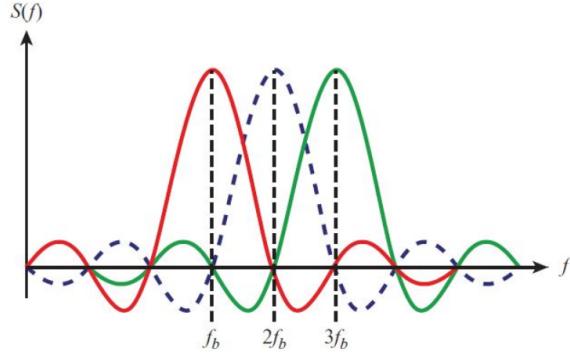
Vogliamo offrire canali differenti usando una divisione in frequenza diversa da FDM. L'obiettivo è quello di garantire lo stesso data rate che avremmo in una trasmissione in TDM ma usando una divisione in frequenza, senza usare troppa banda. Schema:



Lo si implementa tramite uno split da seriale a parallelo ed ogni componente viene inviata ad un modulatore, ognuno dei quali modula rispetto a multipli di una certa frequenza base f_b e alla portante f_0 ; quindi abbiamo una portante f_0 e tante sotto-portanti multiple di f_b . Stessa codifica e modulazione. Alla fine si trasmette la combinazione di tutte le onde create.

Nel caso di FDM classico viene lasciata una guardia per evitare interferenze, si allontanano un po' le frequenze in modo tale che le varie armoniche di una frequenza non possa interagire con le adiacenti.

Ortogonalità: Nell'OFDM le **subcarrier sono ortogonali tra loro** e non interferiscono, i.e., la distanza tra subcarrier è studiata in modo da evitare interferenze. Nel momento di picco di ogni sotto-portante, il contributo delle altre frequenze è nullo.



La scelta di f_b dipende dalla durata dei simboli T :

$$f_b = \frac{1}{T}$$

Tutti i segnali multipli di f_b sono ortogonali tra loro. Si tratta dell'inverso della durata del simbolo.

Considerazioni:

- più robusto riguardo ad interferenze che riguardano solo alcuni subcarrier
- più robusto rispetto ai problemi di multipath perché la distanza tra un simbolo e l'altro è maggiore (ISI ridotta)

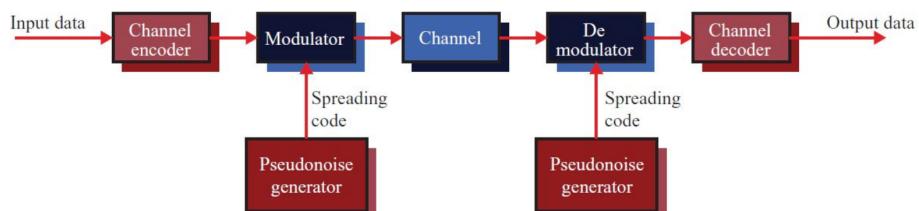
N.B.: in generale multiple access \neq multiplexing, far passare più segnali contemporaneamente è diverso da fare comunicare più utenti contemporaneamente.

TL;DR: Si tratta di un FDM in cui le frequenze sono ortogonali tra loro in modo da non avere interferenze. Le interferenze in FDM erano prevenute tramite l'uso di una guardia, ovvero spazio di banda libero, OFDM permette di usare meno banda.

2.4 Spread Spectrum

Letteralmente “spettro espanso”, consiste nel trasmettere il segnale di informazione su uno **spettro di frequenze più ampio** di quella del segnale. Una banda maggiore del necessario.

La struttura, concettualmente, è



Dopo l'encoding, c'è una fase di **spreading dei dati**, generalmente basato su valori pseudo-casuali (da invertire dopo la ricezione).

Motivazioni:

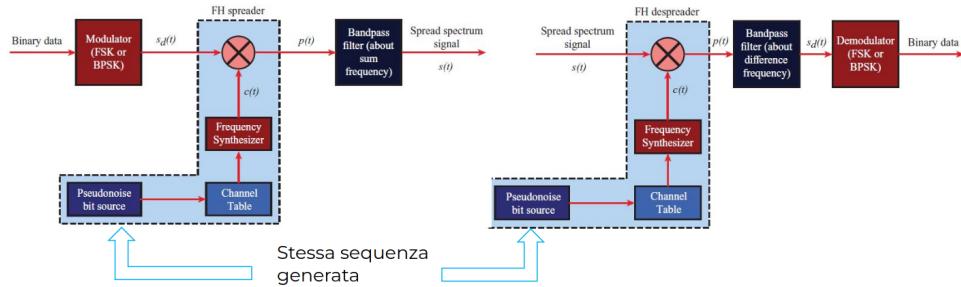
- rendere il segnale più robusto, “spalmandolo” su una banda più ampia lo rende più resiliente a diversi tipi di rumore e interferenze
- nascondere e cifrare il segnale (nato in ambito militare); solo TX e RX sono a conoscenza del codice di spreading (non una tecnica sufficiente, ma a livello radio questo si può fare)
- molti utenti possono usare indipendentemente la stessa banda contemporaneamente senza interferenza. Usata da CDMA

2.4.1 Frequency Hopping Spread Spectrum FHSS

In FHSS il codice di spreading determina quale frequenza usare per trasmettere il segnale. Ad ogni intervallo di tempo prestabilito, la frequenza viene cambiata pseudo-casualmente (frequency hopping). Usato da Bluetooth (802.15.1), “saltando” ogni $625\mu s$.

In altre parole: ho una certa ampiezza di banda e cambio in modo pseudo-casuale la frequenza usata ad ogni intervallo di tempo. Ho n frequenze e ne uso una per volta, cambiata ogni tanto.

Schema di trasmissione e ricezione:



La channel table permette di scegliere la frequenza da utilizzare, in base al valore casuale, ed il sintetizzatore utilizzerà quella frequenza. Il tempo di hopping generalmente è predefinito, serve un seed per la sequenza di valori pseudo-casuali usati per determinare la frequenza usata.

Il frequency hopping è più resistente a rumore e jamming, in quanto compromettere una frequenza non compromette l'intera trasmissione.

Un altro ricevitore che si sincronizza con il trasmettitore può solo leggere alcuni pezzi dei messaggi perché non conosce la sequenza di hopping.

2.4.2 Direct Sequence Spread Spectrum DS-SS

Per una sequenza di D bit, ogni bit della sequenza viene rappresentato da un insieme di bit usando un codice di spread (pseudo-casuale). Ogni bit diventa n bit ottenuti da una sequenza casuale.

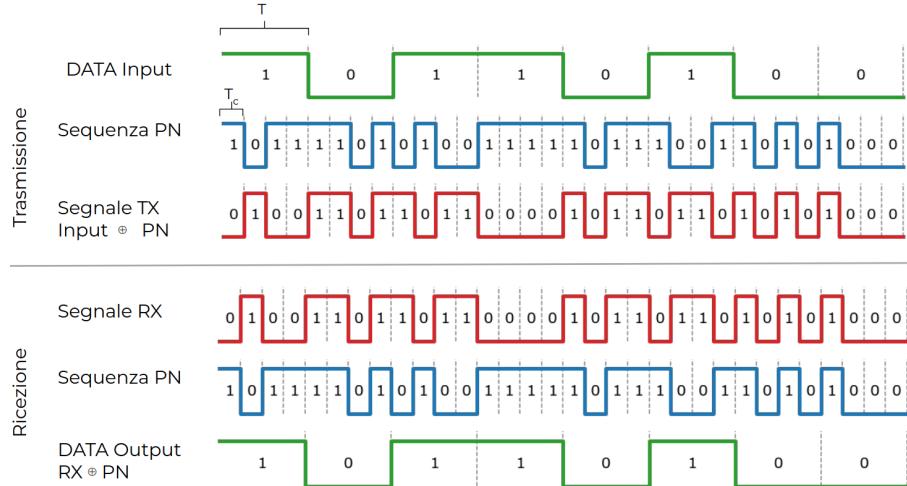
I bit della sequenza di spread “durano meno” (durano $1/n$ del tempo dei bit di informazione) e vengono chiamati “chip”. Per ogni bit originale abbiamo n chip.

Per mantenere lo stesso data rate abbiamo bisogno di n volte la banda (n fattore di spreading).

Generalmente, si usa uno **xor** (in quanto invertibile) degli n bit casuali con il bit da inviare e si invia il risultato. Esempio:

Bit informazione	1				0			
Sequenza di chip	0	1	1	1	0	0	1	0
Trasmesso (XOR)	1	0	0	0	0	0	1	0

Usando BPSK diventa:



In verde il **segnale originale**, in blu la **sequenza pseudo-casuale**, in rosso ciò che viene **effettivamente inviato**.

2.4.3 Code Division Multiple Access CDMA

Differenza tra multiplexing e multiple access:

- multiplexing significa avere più canali di comunicazione
- multiple access: come faccio a far comunicare più utenti

L'idea è utilizzare un canale con una certa banda a disposizione, e tutti i dispositivi possono usare la stessa banda, evitando interferenze.

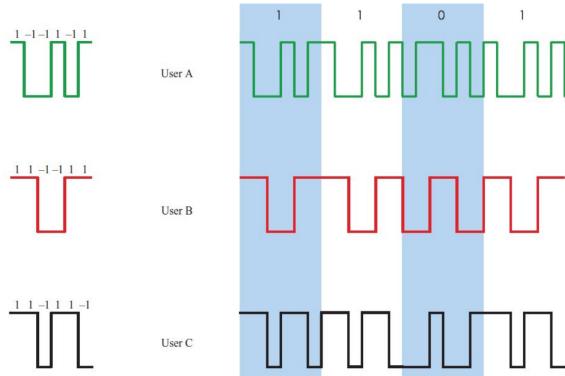
Ogni bit della sequenza da trasmettere viene codificato con un codice largo $k \geq 1$ chip usando un pattern prefissato detto **codice**. Un chip è una sequenza di 1 e -1 (al posto dello 0). Ogni utente ha un codice diverso e di conseguenza produrrà chip diversi. Tutti “parlano assieme” e posso comunque distinguere le informazioni provenienti da un utente specifico.

Sequenze Walsh: Creano un insieme di codici ortogonali (sono in numero limitato).

Sequenze PN, Gold, Kasami: Non ortogonali ma in numero molto maggiore.

Non si ha nessuna divisione della banda, ma uno spettro maggiore che quello per un singolo bit. Ognuno comincia a trasmettere con il proprio codice assegnato senza preoccuparsi di interferenze, starà al ricevitore distinguere i vari segnali. Tutte le forme d'onda vengono trasmesse assieme, senza il problema dell'interferenza.

Esempio di trasmissione da parte di 3 utenti:



Il RX è a conoscenza del codice, numero di chip per bit e la regola (1 viene codificato tramite il codice stesso, 0 tramite l'inverso). Il RX calcola la funzione

$$s_u(d) = \sum_{i=1}^k d_i \cdot c_i$$

Si tratta di una moltiplicazione tra il valore ricevuto ed il relativo bit all'interno del codice: se il risultato della sommatoria è positivo è stato trasmesso un 1, 0 altrimenti.

Esempio: con 3 utenti

User A	1	-1	-1	1	-1	1	
User B	1	1	-1	-1	1	1	
User C	1	1	-1	1	1	-1	

Con un solo segnale, se l'utente A invia un 1:

Transmit (data bit = 1) A	1	-1	-1	1	-1	1	
Receiver codeword A	1	-1	-1	1	-1	1	
Multiplication	1	1	1	1	1	1	=6

Per uno 0, il codice trasmesso sarebbe invertito ed il risultato della sommatoria diventa -6 . In questo caso l'utente A ha trasmesso ed è stato usato il codice di A per decodificare. Se provassi ad usare il codice di A per decodificare un messaggio di B:

Transmit (data bit = 1) B	1	1	-1	-1	1	1	
Receiver codeword A	1	-1	-1	1	-1	1	
Multiplication	1	-1	1	-1	-1	1	=0

Il risultato è 0, quindi non è stato trasmesso da A ma da un segnale ortogonale rispetto ad A. Non è detto che i segnali debbano essere perfettamente ortogonali, possono anche esserci interferenze:

Transmit (data bit = 1) C	1	1	-1	1	1	-1	
Receiver codeword A	1	1	-1	-1	1	1	
Multiplication	1	1	1	-1	1	-1	=2

Non sono perfettamente ortogonali quindi risulta in una interferenza, il risultato è però troppo basso per essere interpretato come un valore corretto.

Ma l'idea è che tutti trasmettano assieme, quindi i segnali possono combinarsi:

B (data bit = 1)	1	1	-1	-1	1	1	
C (data bit = 1)	1	1	-1	1	1	-1	
Combined signal	2	2	-2	0	2	0	
Receiver codeword B	1	1	-1	-1	1	1	
Multiplication	2	2	2	0	2	0	=8

Cercando di estrarre cosa ha mandato B (ovvero usando il codice B) risulta un segnale abbastanza alto da poter essere interpretato come 1.

Più è alto il numero di utenti più lo spreading factor deve essere alto (lunghezza del codice), riducendo il data rate del dispositivo. Può essere modulato in funzione del numero di utenti, quando ci sono tanti utenti connessi viene usato uno spreading factor maggiore.

Near-Far Problem: Questo sistema funziona bene se i vari segnali ricevuti hanno più o meno la stessa potenza, ma utenti più lontani avranno una potenza minore (se tutti trasmettono con la stessa potenza).

La soluzione è utilizzare potenze diverse in base alla distanza (sì, consuma più batteria).

3 Wireless Personal Area Network WPAN

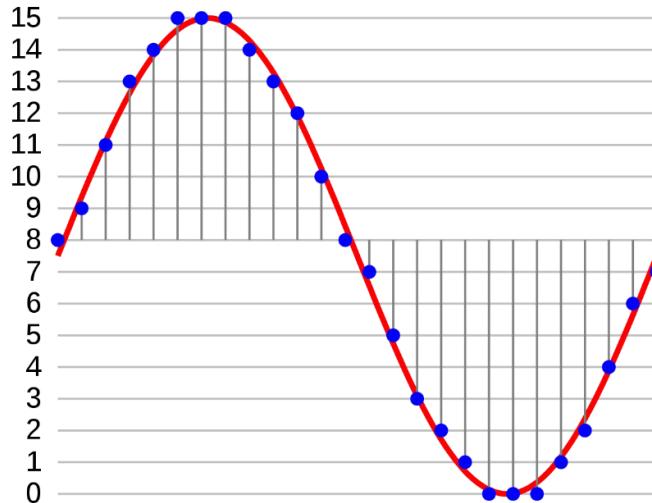
3.1 ISM Band

Ci sono **porzioni di banda unlicensed**, ovvero che non necessitano di licenza per essere utilizzate. Sono riservate per usi industriali, scientifici e medici (ISM).

Bluetooth, Wi-Fi, apparecchi medici e tutti i dispositivi wireless comunicano sulle stesse frequenze. Essendo condiviso, le varie tecnologie devono tollerare interferenze.

3.2 Pulse Code Modulation PCM

Si tratta di una codifica lossless per onde. Partendo da un segnale continuo, l'ampiezza della curva viene quantizzata in livelli (intervalli) e viene effettuato un campionamento. La frequenza di campionamento è il doppio della frequenza massima da campionare (Teorema del campionamento di Shannon).



Per la voce telefonica: PCM 8bit $8000Hz$, quindi $64kbps$ (frequenza della voce $300 - 3400Hz$). La musica viene campionata a 24bit $41/48kHz$.

3.3 802.15.x

Lo standard 802.15 comprende un insieme di tecnologie per la **comunicazione a corto raggio** (<https://www.ieee802.org/15/>).

Esempi di tecnologie:

- 802.15.1 Bluetooth
- 802.15.2 High-rate WPAN
- 802.15.4 Low-rate WPAN (es. Zigbee)
- 802.15.5 Mesh Networking (combinazione di High-rate e Low-Rate)
- 802.15.6 Body Area Network (BAN) pensato ad esempio per applicazioni in ambito medico
- 802.15.7 Visible Light Communication (VLC) (es. Vehicle-to-vehicle communication & Li-Fi)

3.4 Bluetooth

Si tratta dello standard 812.15.1. Si compone di reti chiamate piconet ed all'interno della rete si ha un dispositivo **master** e **uno o più slave** sotto il controllo del master, che controlla la piconet.

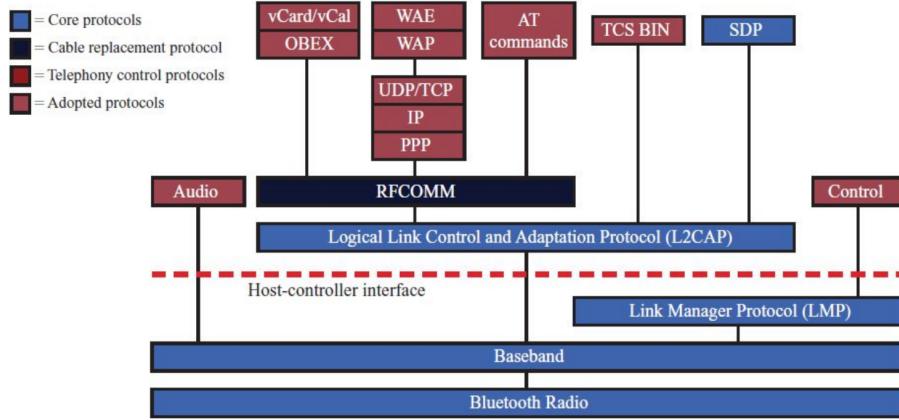
Caratteristiche:

- Short range (10-50m nei casi d'uso tipici a seconda della classe di potenza del dispositivo, **Bluetooth range estimator**)
- Usa la banda ISM **2.4GHz**
- Data Rate: **2.1Mbps – 24Mbps**

Utilizzi:

- punto di accesso per dati e voce
- sostituzione di cavi (periferiche wireless)
- comunicazione ad hoc con altri dispositivi Bluetooth

3.4.1 Architettura dei protocolli



In blu sono i “core protocols”, presenti in tutti i dispositivi Bluetooth. Gli altri (rossi e blu scuro) sono implementati solo se il dispositivo ne necessita, in base all’uso.

Bluetooth Radio: La parte di livello fisico, specifica l’interfaccia radio:

- radio frequenze, quali frequenze utilizzare
- gestisce il frequency hopping
- decide lo schema di modulazioni in base al canale
- determina la potenza di trasmissione

Baseband: Il livello di Baseband si occupa di

- stabilire la connessione con la piconet
- gestire l’indirizzamento
- formattazione dei pacchetti (frame)
- gestire le tempistiche di comunicazione (Time Division Duplex TDD e Time Division Multiple Access TDMA)
- gestisce la potenza di trasmissione (passa le indicazioni a livello radio)

Link Manager Protocol LMP: Fa da “manager” del collegamento. Si occupa di:

- configurare i collegamenti tra dispositivi
- gestione di collegamenti attivi
- funzionalità di sicurezza e cifratura

Si tratta di un protocollo di controllo, non passano dati ma gestisce il collegamento per i livelli sottostanti.

Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP): I livelli precedenti erano implementati sul chip Bluetooth, da qui in su vengono implementati a livello software. Si occupa di:

- adatta i protocolli di livello superiore al livello baseband
- astrarre tutto ciò che c’è sotto per i servizi a livelli superiori, *Connectionless* e *Connection-oriented*

Service Discovery Protocol SDP: Gestisce le informazioni del dispositivo. Permette di comunicare

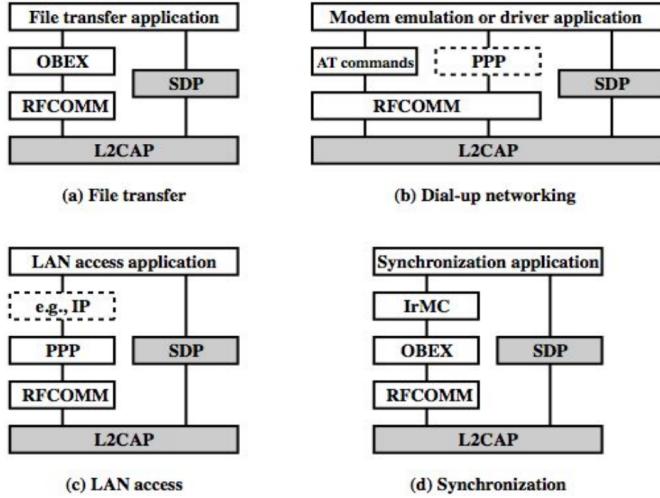
- servizi disponibili sul dispositivo
- caratteristiche sul dispositivo

Stile architettura client-server: prevede interrogazioni richiesta-risposta per stabilire connessioni tra dispositivi Bluetooth.

Radio Frequency Communication RFCOMM: Astra il livello di Bluetooth, permette di “astrarre un cavo”. Simula una comunicazione seriale e permette la trasmissione di dati tra dispositivi Bluetooth.

Livelli superiori: I livelli in rosso sono protocolli “già esistenti”, ciascun dispositivo può avere parte di questi protocolli in base all’uso, i livelli inferiori permettono la comunicazione a livello fisico.

Profili: Per avere determinate funzionalità un dispositivo deve seguire dei “profili”. Esempi di profili:

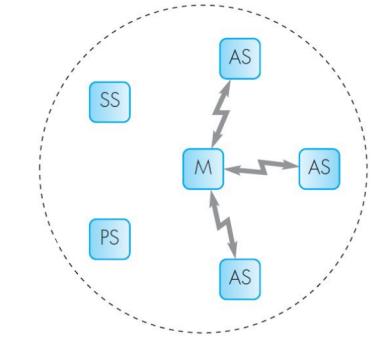


Questi sono standard, un dispositivo deve aderire ad uno o più profili (annunciati dal SDP) per avere il relativo utilizzo.

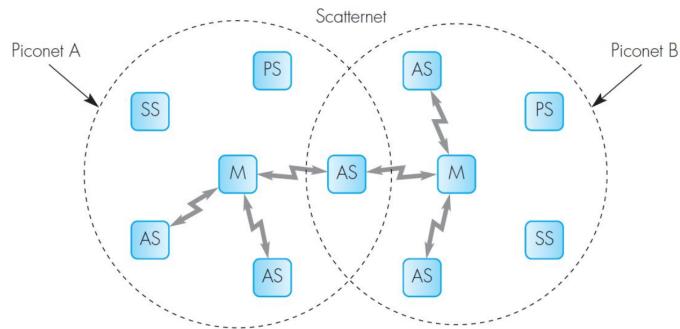
3.4.2 Piconet & Scatternet

Piconet: Una piconet è composta da un **master** e

- **Active Slave (AS):** membro attivo delle piconet, con un indirizzo Active Member Address (AMA) su 3 bit assegnato dal master (0 è il master, quindi 7 dispositivi al massimo)
- **Parked Slave (PS):** membro della piconet ma temporaneamente disattivato, non possono comunicare attivamente ma solo ogni tanto tramite il Parked Member Address (PMA), 8 bit (0 è il master); un parked può tornare attivo solo se “c’è spazio”
- **Standby Slave (SS):** non sconosciuti ma scollegati; non hanno indirizzi e possono quindi essere infiniti



Scatternet: La piconet ha al centro sempre un master, ma un dispositivo può appartenere a più piconet, portando ad una scatternet



In qualsiasi caso i master lavorano in maniera completamente **separata**. Un AS attivo in due piconet diverse avrà indirizzamento diverso sulle due reti.

3.4.3 Bluetooth Radio

Specifiche radio Bluetooth 2.1:

	Basic Rate (BR)	Enhanced Data Rate (EDR)
Topology	Up to 7 simultaneous links in a logical star	
Modulation	GFSK	$\pi/4$ -DQPSK and 8DPSK
Peak data rate	1Mbps	2Mbps and 3Mbps
RF bandwidth	220kHz($-3dB$), 1MHz($-20dB$)	
RF band		2.4GHz, ISM band
RF carriers		23/79
Carrier spacing		1MHz
Transmit power		0.1W
Piconet access		FH-TDD-TDMA
Frequency hop rate		1600 hops/s
Scatternet access		FH-CDMA

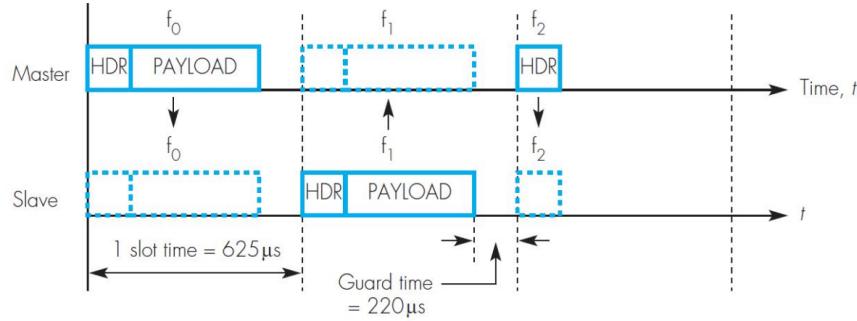
Per gestire le scatternet si usa FH-CDMA, anche in caso due scatternet comunichino sulla stessa frequenza si usa CDMA per poter distinguere i segnali.

Classi di potenza: I dispositivi Bluetooth si differenziano in base alla classe di potenza

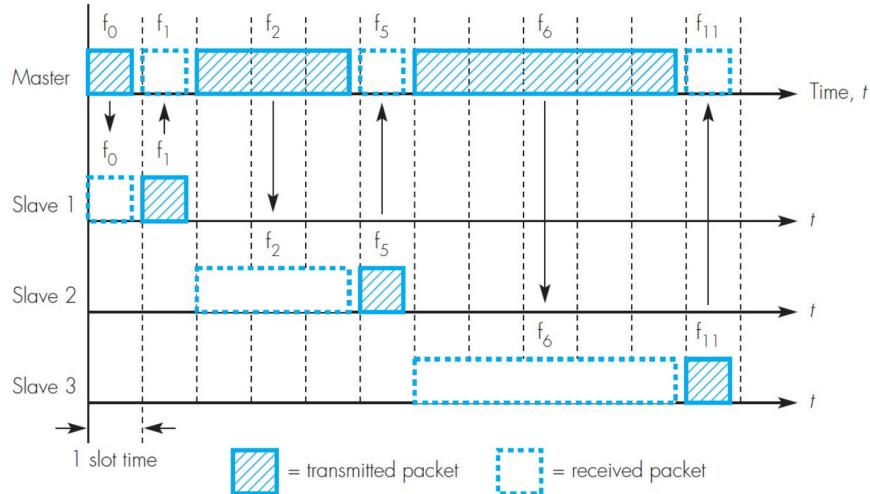
- Power class 1: 100mW 100 metri (senza ostacoli)
- Power class 2: 2.5mW 10 metri (più tipico per BT)
- Power class 3: 1mW 1-2 metri

Comunicazione nelle piconet: All'interno di una piconet vengono usate

- Frequency Hopping FH: la frequenza è decisa dal master e condivisa agli slave nella piconet
- Time Division Duplex TDD: la comunicazione tra master e slave è gestita in tempo e alternata, prima comunica il master con lo slave, poi si invertono, con slot di $625\mu s$ (inclusa una guardia di $220\mu s$)
- Time Division Multiple Access TDMA: per gestire più dispositivi nello stesso momento



Esempio a più dispositivi:



Nelle frequenze pari master a slave, nelle frequenze dispari viceversa. Più slave vengono coordinati tramite TDMA, ovvero il master decide chi parla in quale slot di tempo. La **dimensione dei messaggi** può essere di 1, 3

o 5 slot di tempo consecutivi (dispari per mantenere l’alternanza in TDD). Nell’header di ogni pacchetto c’è la dimensione.

La frequenza usata dal frequency hopping è data dal numero di timeslot passati, non dal numero di messaggi, quindi al time slot 5 viene usata la quinta frequenza f_5 , anche se sono stati inviati solo 3 messaggi. Per una singola trasmissione (messaggio) viene mantenuta la stessa frequenza (non cambia a metà). All’interno della piconet tutti i clock devono essere sincronizzati.

Scatternet: Nel caso di una scatternet, ogni piconet che la compone ha tutto diverso: diverse frequenze, diverso clock e di conseguenza completa autonomia. Un AS connesso a più piconet deve essere in grado di gestire le due connessioni indipendentemente.

Su 79 canali, cambiati ogni $625\mu s$, può capitare una sovrapposizione (quindi interferenza), possibili soluzioni sono:

- FH su un numero ridotto di canali, e.g., ogni piconet su 20 canali e si spera non ci sia sovrapposizione in quei 20
- Si usa CDMA per evitare interferenze; il master comunica un codice ortogonale ai dispositivi all’interno della piconet (soluzione usata)

3.4.4 Baseband

Tipologie di servizio: Offre due possibili canali logici:

- **Synchronous Connection-Oriented Link (SCO)** point-to-point:

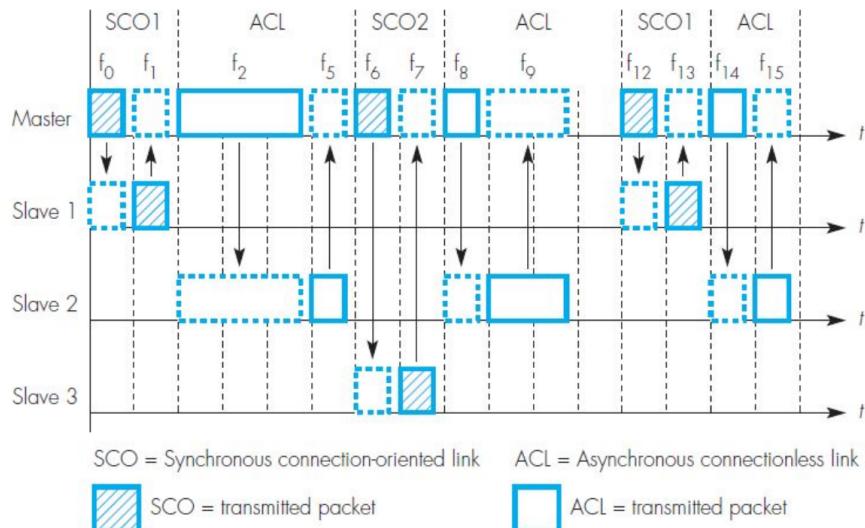
- canale audio/voce di 64 kbps bidirezionale
- il master riserva una coppia di slot adiacenti ad intervalli regolari
- previsti fino al massimo di 3 canali SCO attivi contemporaneamente
- traffico real time

Garantiscono un bit rate fisso, un canale riservato, usato per casistiche sensibili al delay (real time).

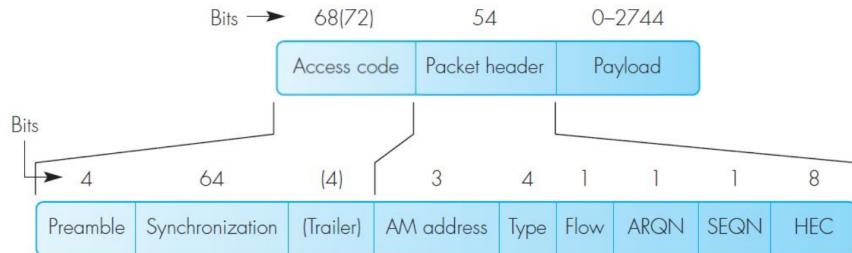
- **Asynchronous Connectionless Link (ACL)** point-to-multipoint:

- canali ACL occupano gli slot rimanenti
- traffico dati con ciascuno degli slave
- un solo ACL contemporaneo fra master e uno slave
- traffico best effort (nessuna garanzia di delay)

Bit rate non costante, permette una qualità maggiore ma senza nessuna garanzia.



Formato pacchetti:



Access code: utilizzato per sincronizzazione e identificazione. Può essere di 3 tipi:

- Channel Access Code (CAC): identifica la piconet (derivato dai 48 bit dell'indirizzo hardware del master)
- Device Address Code (DAC): derivato dall'indirizzo hardware dello slave ed è usato dal master per chiamare il dispositivo (paging)
- Inquiry Address Code (IAC): usato per trovare l'indirizzo di un dispositivo vicino (durante la fase di inquiry)

Packet Header: ha diversi campi:

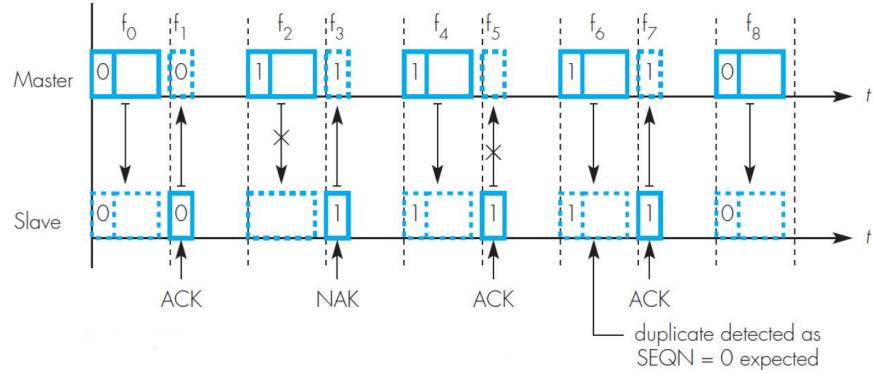
Campo Header	
AMA	Indirizzo del membro attivo della piconet
Type	Identifica la tipologia del pacchetto e il formato del pacchetto SCO/ACL, numero di slot ecc...
Flow	Per gli ACL: stop (1), resume (0)
ARQN	1 ACK, 0 NACK
SEQN	Sequence number modulo 2
HEC	Controllo errori del campo header (1/3 FEC)

ARQN e SEQN sono 2 bit necessari e sufficienti per il controllo degli errori (bastano grazie alla rigida struttura di comunicazione delineata al livello precedente).

Payload: contenuto effettivo del pacchetto può essere:

- SCO: 30 byte, (FEC 0, 2/3, 1/3), che porta a massimo 64 kbps , dato che $(30 \cdot 8) \cdot (1600/6)$, ovvero $30 \cdot 8$ bit,
- ACL: variabile da 0 a 343 byte

Controllo degli errori:



All'interno del quadrato blu si vede il SEQN, mentre ACK/NACK sono indicati al di fuori.

Sequenza tipica:

- Il master invia un pacchetto con un SEQN s
- lo slave risponde con un ACK ed un SEQN s (lo stesso)

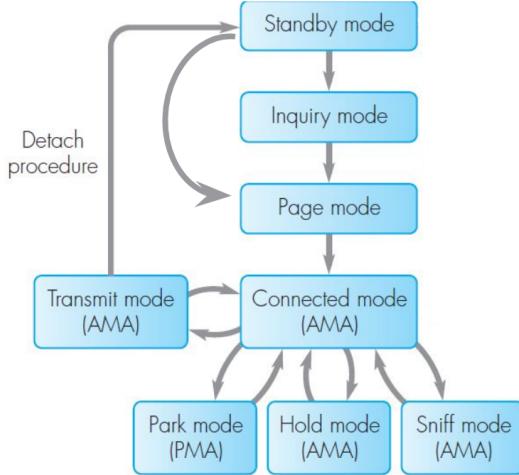
Possibili problemi:

- Lo slave non riceve il pacchetto: invierà un NACK per indicare la mancata ricezione, nello slot successivo deve parlare lo stesso dato che “è il suo turno”, sa che ci sarà un SEQN pari a $\neg s$ ma non ha ricevuto nulla e lo indica con il NACK. “Non ho ricevuto e mi aspettavo questo”
- Se il master non riceve risposta dallo slave (ACK perso), il pacchetto viene re-inviato, con la possibilità di inviare un duplicato, ma meglio che perdere pacchetti
- Lo slave riceve un duplicato e se ne accorge in quanto il SEQN è uguale a quello precedente (il master non ha ricevuto l'ACK, non è cambiato il SEQN, quindi è una ritrasmissione del pacchetto precedente)

La rigidità dell’alternanza tra master e slave permette di rendere minimale lo spazio necessario per effettuare il controllo degli errori.

3.4.5 Link Manager Protocol

Transizioni di stato:



Standby Mode: A dispositivo “appena acceso” entra in standby mode, non membro di alcuna piconet, minimo consumo.

Inquiry mode: Periodicamente il master invia 32 messaggi consecutivi usando 32 canali (wake-up channels, la sequenza è standard). I messaggi contengono un **IAC packet**. Gli slave periodicamente ascoltano i 32 canali per vedere se qualcuno ha mandato un IAC packet. Tutto questo in modo non coordinato.

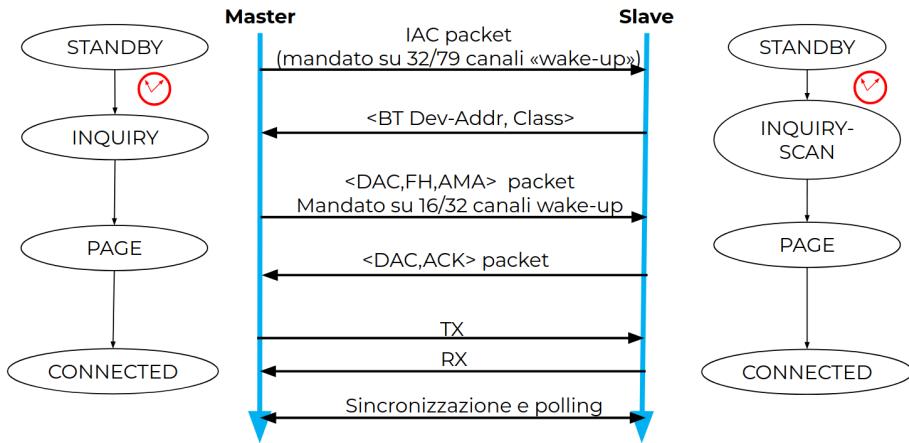
Ogni dispositivo ascolta per $11,25ms$, all’inizio di ogni intervallo di $1,28$ o $2,56s$. Una volta “beccata” una trasmissione del master si aspetta un numero random di slot di tempo (random backoff) prima di trasmettere la risposta (per evitare che più slave che hanno ascoltato quella trasmissione rispondano nello stesso momento). Possiamo farlo dato che adesso l’unica cosa che sappiamo è il clock del master, ricevere un qualsiasi segnale del master permette di sincronizzarsi con la piconet. La risposta contiene il Bluetooth Device Address dello slave e la classe, per indicare il tipo di dispositivo.

Lo slave ascolta su una delle 32 frequenze di wake-up, mentre il master invia

sempre su tutte e 32. In questo modo, ascoltando per un certo periodo di tempo, se, anche solo *vagamente* allineato, lo slave vedrà la comunicazione del master (insomma, prima o poi la becca). Poi c'è un random backoff di un certo numero di slot di tempo prima di rispondere al master per richiedere il FH, DAC e AMA, inviato su 16 dei 32 canali di wake up (simile a prima).

Per finalizzare la connessione mancano le frequenze di hopping: si usano 16 delle 32 frequenze standard, per mandare: Device Access Code DAC, la sequenza di FH e l'Active Member Address AMA dello slave.

Lo slave risponde con DAC e ACK, poi può cominciare la comunicazione.



Fase di paging: Dopo la fase di inquiry, il master invia messaggi di paging per richiamare il dispositivo target, fornire tutti i dati di sincronizzazione necessari e stabilire definitivamente la connessione.

Altri stati: Un dispositivo “attivo” può essere:

- **Connected:** connessi ma non stiamo trasmettendo, sta solo ascoltando il master.
- **Transmit:** quando deve trasmettere va in transmit mode.

Entrambe queste modalità fanno uso del AMA.

Entrambe queste modalità consumano batteria (transmit un po' di più, ma comunque consumano), di conseguenza ci sono **3 stati di power saving** (in ordine discendente di consumo):

- **Sniff Mode:** non ascolta tutti gli slot (mantiene AMA)
- **Hold Mode:** ascolta solo canali SCO (mantiene AMA)
- **Park Mode:** rimane membro della piconet ma rilascia l'AMA e gli viene assegnato un PMA. Periodicamente ascolta i messaggi che il master invia in broadcast a tutti i membri parked. Rimane sincronizzato con clock e FH del master. Può tenere spenta la radio mentre non ascolta, per risparmiare batteria (ma ogni tanto va accesa per risincronizzare il clock, bisogna mantenere quello del master)

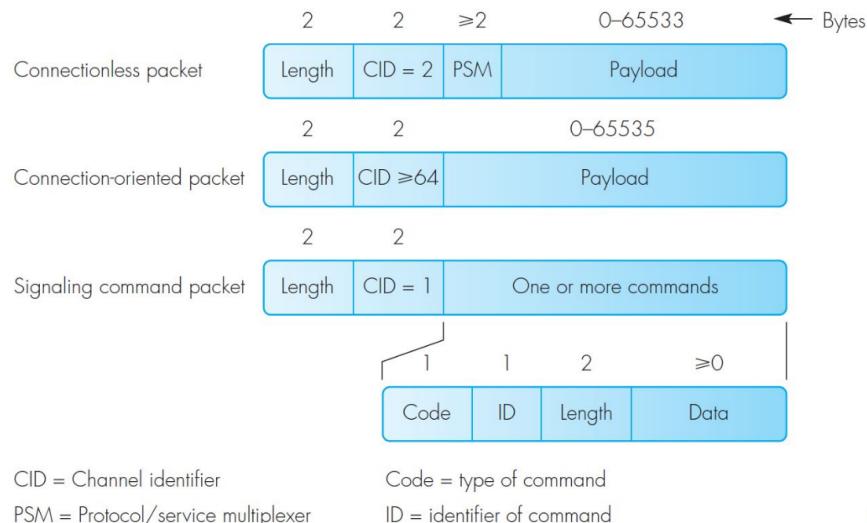
3.4.6 Logical Link Control and Adaptation Protocol L2CAP

Sempre presente in tutti i dispositivi Bluetooth, ma è il primo livello software (richiede combinazione di pacchetti a livello fisico). Non viene usato per l'audio (maggior parte dei canali SCO).

Supporta solo canali ACL. Offre 3 tipi di **canali logici**:

- **Connectionless**: unidirezionale, ad esempio tra broadcast e slave, per quando non c'è la necessità di instaurare una connessione
- **Connection-oriented**: bidirezionale e supporto QoS (richiedere una certa qualità del canale)
- **Signaling**: bidirezionale usato per messaggi di controllo master/slave, controllo di un livello superiore

Formato dei pacchetti:



La dimensione è segnata in byte, i pacchetti sono molto più grandi di quelli a livello baseband, la **segmentazione ed assemblamento** dei frame inviati a livello baseband viene **effettuata da L2CAP** (stile ethernet e trasporto, il messaggio sopra viene ricostruito, anche se sotto è diviso in più messaggi).

I valori del Channel Identifier possibili sono:

- CID = 2: non c'è nessuna connessione, pacchetto per connectionless
- ID ≥ 64 : pacchetto connection-oriented, il numero indica la connessione
- CID = 1: usato per i pacchetti di signaling/controllo

Al posto di avere dati relativi all'applicazione, il payload di un pacchetto di controllo contiene

- Code: codice per il tipo di comando
- Id: per l'identificatore del comando

Poi lunghezza e dati.

3.4.7 Service Discovery Protocol SDP

Protocollo **client-server** in cui un server contiene le informazioni ed il client ha due possibili azioni:

- ricerca di un servizio
- browse dei servizi (lista dei servizi disponibili su un dispositivo)

Generalmente, master chiede (client), slave rispondono alle richieste (server).

3.5 Bluetooth Low Energy BLE

Ha come **obiettivi**:

- ridurre il consumo energetico dei dispositivi
- entrare nel mondo degli smart sensor (di solito difficilmente ricaricabili, quindi da fare il meno possibile)
- semplificare il sistema di comunicazione (l'inquiry è complicato)
- compatibile con più dispositivi Bluetooth

Introduce **nuove funzionalità**: prima l'unica struttura possibile era master-slave, ma non bastava più per gli usi possibili del Bluetooth. Si aggiungono **altre strutture** di comunicazione:

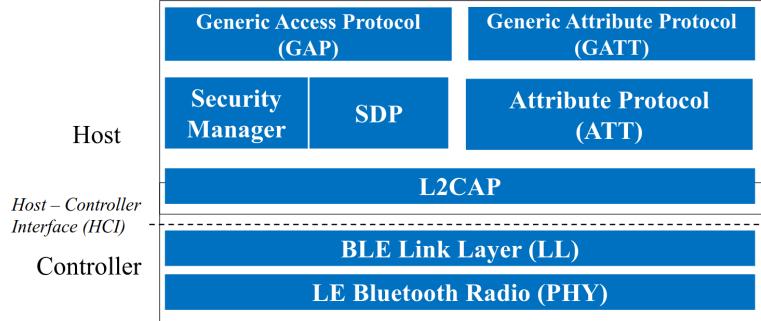
- **Broadcast**: più flessibile, chi è in range ascolta un broadcaster
- **Mesh**: struttura meno rigida, ogni dispositivo connesso a molteplici altri

Poi si aggiungono funzionalità di **positioning**:

- rilevare la **presenza** di un dispositivo
- rilevare la **distanza**
- rilevare la **direzione** dal dispositivo

Si tiene la stessa banda ISM, ma i canali sono 40 al posto che 79, rendendoli più resistenti ad interferenza (anche se abbassando il data rate).

3.5.1 Architettura



I livelli fisici cambiano in quanto è cambiata la trasmissione radio. Eccetto i primi 2, il resto è “equivalente” all’architettura del 2.1, con qualche modifica ovviamente.

3.5.2 Classi di potenza

Power Class	Max Output Power (P_{max})	Min Output Power ¹
1	100 mW (+20 dBm)	10 mW (+10 dBm)
1.5	10 mW (+10 dBm)	0.01 mW (-20 dBm)
2	2.5 mW (+4 dBm)	0.01 mW (-20 dBm)
3	1 mW (0 dBm)	0.01 mW (-20 dBm)

La perdita di potenza (il minimo è minore) sono parzialmente “controbilanciate” dallo spettro più ampio che permette una migliore ricezione.

3.5.3 BLE Radio (PHY)

Non cambia lo spettro, sempre $2.4GHz$ ISM, ma viene diviso in 40 canali, dei quali 37 usati per data packets, mentre gli ultimi sono usati come *advertising*.

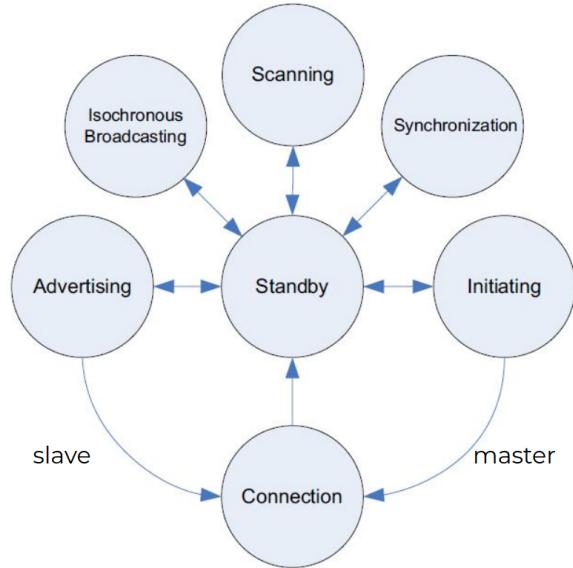
La sequenza di FH è determinata dalla formula

$$\text{channel} = (\text{curr_channel} + \text{hop}) \bmod 37$$

il valore di “hop” è il “segreto” su cui fare viene fatto hopping.

Con la Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK) con rate di modulazione si raggiunge $1Mbps$.

3.5.4 BLE State Machine



Tutti partono dallo standby.

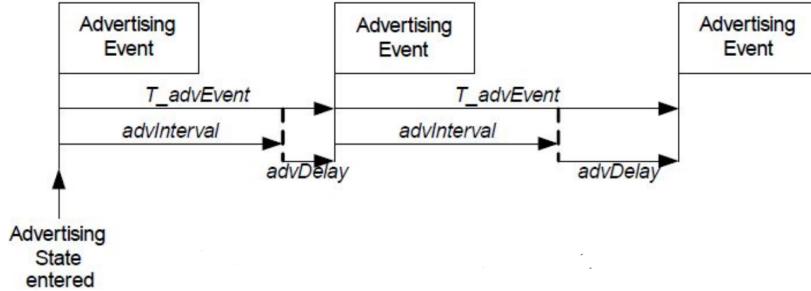
Advertising: usa i canali di advertising per farsi conoscere, non è più il master che cerca per creare la piconet, ma è lo slave che si annuncia.

Initiating: Lo stato in cui vengono ascoltati i messaggi di advertising.

Isochronous Broadcasting: broadcasting periodico (isocrono) per emettere delle informazioni.

Scanning: Il dispositivo si mette in ascolto.

3.5.5 Advertising



Ogni certa quantità di tempo viene inviato un **advertising event**, su uno o più dei canali di advertising. Il tempo tra un advertising event e l'altro è determinato da:

$$T_{advEvent} = advInterval + advDelay$$

Dove

- **advInterval** è un intero multiplo di $625\mu s$ nel range $20ms - 10,24s$ ed è determinato in base all'uso del dispositivo (per esempio, un sensore della temperatura non ha bisogno di inviare dati spesso quanto un accelerometro); il rate di invio determina il consumo della batteria
- **advDelay** è un valore pseudo-random nel range $0-20ms$ (per evitare sovrapposizioni, sempre multiplo di $625\mu s$)

3.5.6 Generic Attribute Profile GATT

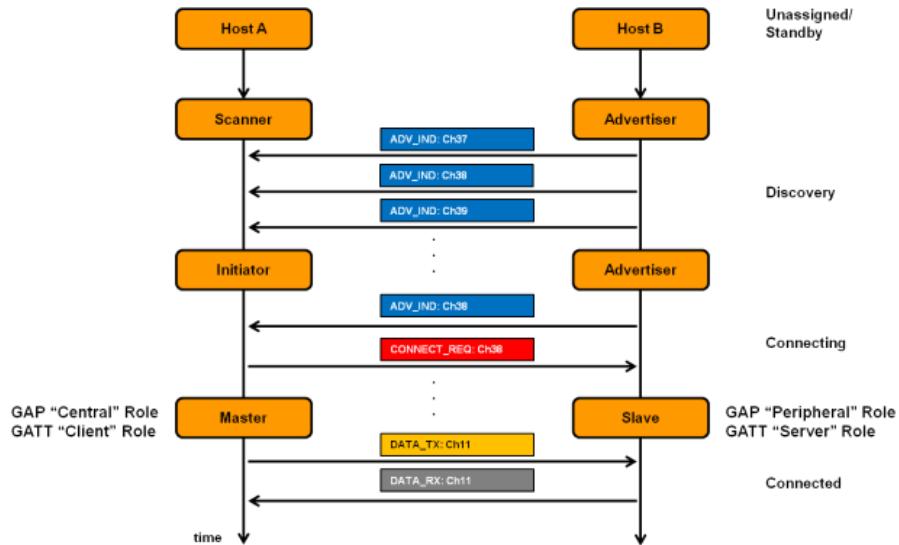
Viene gestito dal modulo GATT all'interno dell'architettura, permette uno scambio di dati strutturato tra server, che offrono servizi tramite profili (e.g., fascia che misura la frequenza cardiaca avrà un Heart rate profile) e client che richiedono (e.g., smartphone che chiede la frequenza cardiaca). Ogni profilo ha i suoi dati e caratteristiche associate. Il ruolo di server o client non è fisso, può cambiare dinamicamente in base alla necessità.

3.5.7 General Access Protocol GAP

Un'applicazione, in base al suo scopo, può decidere uno dei “ruoli fondamentali” definiti dal GAP:

- **Broadcaster:** spedisce pacchetti di advertising. Trasmissione di dati connectionless come eventi di advertising
- **Observer:** riceve advertising packet. Ricezione di pacchetti connectionless
- **Peripheral:** un peripheral device opera in slave (advertiser) mode a livello di Link Layer
- **Central:** un device opera in master (initiator) mode a livello di Link Layer

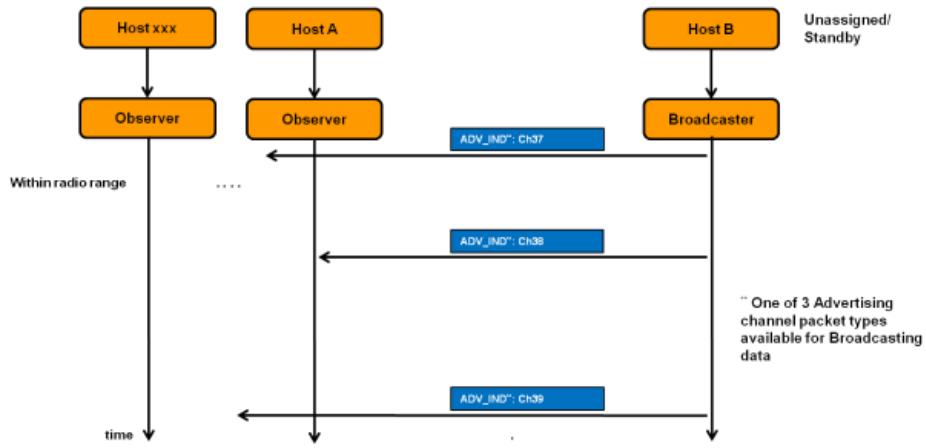
Creazione di una Connessione Unicast (peer to peer): Host A sarà il master, B lo slave.



In questo caso è il **master che ascolta** ed il dispositivo slave è un advertiser, vuole essere trovato dal master mandando advertising packets undirected (diretti a “nessuno”), vogliono solo dire ad un initiator che c’è *qualcuno* che vuole collegarsi. Vengono inviati sui 3 canali di advertising, di conseguenza il master ascolterà sugli stessi canali.

Una volta che il master “sente” il messaggio, invierà una connection request nello slot di tempo successivo (si mantiene sempre il TDD, sappiamo che nello slot di tempo successivo all’invio il dispositivo starà aspettando). Nella connection request ci sono anche le informazioni per il FH. Dopo la richiesta di connessione si passa a master e slave per la trasmissione.

Connessione Broadcast: Si può anche avere una connessione “broadcast”, non peer to peer, in cui abbiamo un broadcaster, che non ha interesse ad avere un master, vuole solo inviare dati.



Gli observer (quelli che ascoltano) saranno tutti i dispositivi all’interno del range di comunicazione.

Passive scanning: Lo scanner ascolta passivamente e periodicamente sui canali di advertising (solo passivo).

Active scanning: Sempre e solo usando i canali di advertising, lo scanner ascolta sul canale per poi richiedere dei dati tramite scan request (e di conseguenza otterrà la response). Quest’ultima parte è unicast con il dispositivo di broadcast.

3.6 ZigBee

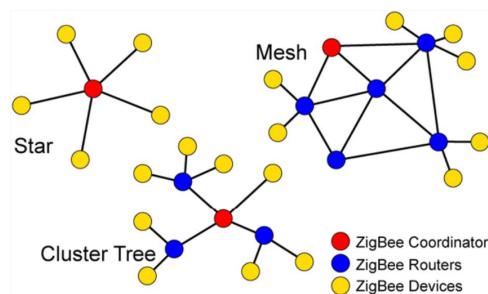
Sempre sotto 802.15, gli standard sono IEEE quindi siamo a livello fisico e data link.

I requisiti richiesti a ZigBee sono:

- Affidabilità
- Basso costo
- Lunga durata della batteria (molto più che Bluetooth)
- Bassa complessità
- Utilizzo delle bande ISM ($2.4GHz$ Worldwide & $915MHz/ 868MHz$ in base alla zona)
- Scalabilità (possibile un alto numero di nodi), con diversi possibili struttture
- Interoperabilità tra vendors
- Sicurezza

Gli utilizzi sono principalmente in ambiti di domotica, IoT, monitoring, ma possono essere i più svariati, qualunque ambito richieda comunicazione di “pochi” dati tra più dispositivi con un basso consumo di energia.

Topologie di rete Sono possibili più tipologie di rete: stella, albero, mesh.



Si introducono topologie multi-hop, quindi serve avere del routing.

Ci sono due macro classi di nodi:

- **Full Function Device FFD**
- **Reduced Function Device RFD**

Il nome è abbastanza autoesPLICATIVO, tra i FFD c'è un solo coordinatore (ZigBee Coordinator) ed uno o più Router, i quali possono fare instradamento. Gli end device sono (solitamente) RFD, non possono fare routing, possono solo comunicare e ricevere dati verso il coordinatore/loro router di competenza (questi sono sensori, raccolgono dati/piccole azioni).

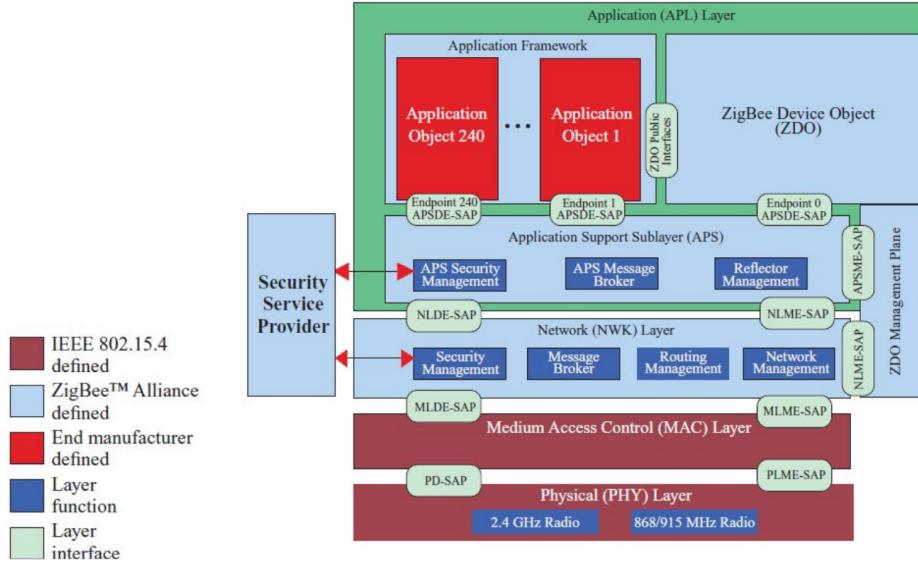
Quindi i dispositivi possono fare da:

- **Coordinator** (PAN coordinator) FFD: unico all'interno della rete, la crea e ne mantiene le informazioni (es. chiavi di sicurezza)
- **Router** FFD: nodi che hanno la capacità di inoltrare dati tra i dispositivi ZigBee
- **End device** RFD: da punto di vista di rete possiedono solo la funzionalità di parlare ad un router/coordinatore; ridotta complessità ed elevato risparmio energetico

Tipologie di invio dati: Ci sono diverse possibili tipologie di dati, in base al caso d'uso:

- **Dati periodici:** invio dopo un intervallo di trasmissione fissato (es: sensori per misurare qualcosa)
- **Dati intermittenti (asincroni):** i dati vengono comunicati in base ad un evento (es: qualsiasi tipo di attuatore come un interruttore)
- **Dati ripetitivi e a bassa latenza:** allocazione di time slot (es: mouse)

Architettura: L'architettura di ZigBee si presenta come:



3.6.1 Livello Fisico 802.15.4 (PHY)

Lo standard 802.15.4 specifica la tipologia di modulazione e spread spectrum per le 3 bande

Banda	# Canali	Spread Spectrum			Data rate	
		Tipo	Chip Rate (chip/s)	Modulazione (dei chip)	Symbol rate	Bit rate
868-868.6 MHz	1	DSSS 1bit → 15 chip (max)	300.000	BPSK 1 chip	20 ksym/s	20 kb/s
902-928 MHz	10	DSSS	600.000	BPSK 1 chip	40 ksym/s	40 kb/s
2400-2483.5 MHz	16	DSSS 4 → 32 chip (16 sequenze di 32 chip quasi ortogonali)	2.000.000	O-QPSK 2 chip	62.5 ksym/s (1 simbolo di 32 chip → 4 bit)	250 kb/s

Si usa multiplexing su canali all'interno della banda, spread spectrum DSSS per la comunicazione. Si può notare che i data rate sono molto limitati, ma i dati generalmente trasferiti da sensori/casi d'uso di ZigBee sono anch'essi abbastanza ridotti.

3.6.2 Livello Data Link 802.15.4 (MAC)

Questo livello si occupa di:

- Gestire l'invio dei beacon (se il dispositivo è PAN Coordinator)
- Sincronizzazione con i beacon del coordinatore (router & end device)
- Associazione/dissociazione alla Pan ascoltando i beacon
- Accesso al canale tramite CSMA/CA
- MAC Address (16 o 64 bit)
- Gestione del duty cycle del dispositivo

Si possono avere due tipi di trasmissioni:

- diretta: dispositivo \leftrightarrow coordinatore
- indiretta: coordinatore \rightarrow dispositivi

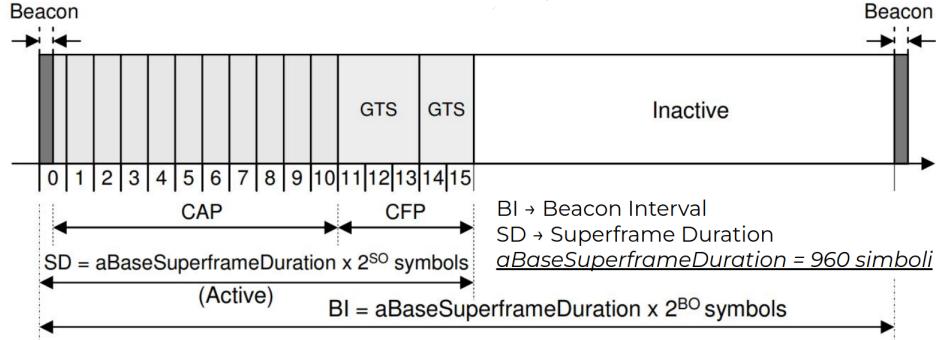
Modalità di trasferimento: Ci sono due modalità

- **Unslotted CSMA/CA** senza ausilio di beacon
- **Slotted CSMA/CA utilizzo di beacon**

Slotted CSMA/CA: La modalità slotted si fonda sull'invio di **beacon**. Questi sono inviati dal coordinatore ed eventualmente inoltrati dai router. Il coordinatore invia periodicamente dei beacon per:

- sincronizzare gli altri dispositivi
- organizzare i periodi di trasmissione per le diverse tipologie di trasmissione (periodiche, asincrone e bassa latenza)
- gestione della trasmissione indiretta: il coordinatore mantiene in una lista le frame non ancora mandate ai dispositivi (poi i dispositivi faranno “Ah devo ricevere qualcosa, ascolterò quello che ha da mandarmi”); nei beacon frame trasmette anche la lista dei dispositivi che hanno frame pendenti (gli dà il permesso di parlare); i dispositivi che ascoltano i beacon sanno se c’è qualcosa per loro

L'organizzazione che il coordinatore ha in mente (solo logica) per la gestione del tempo di comunicazione è definita **superframe** (sostanzialmente tutto ciò che passa tra un beacon e l'altro).



La prima metà è un momento di attività, la seconda è di inattività, poi si ripete il duty cycle. Il **duty cycle** vuol dire che si alternano periodi di attività, in cui la radio è accesa, a periodi di inattività, a radio spenta (momenti in cui non ci sono trasmissioni programmate, quindi è inutile tenere la radio accesa). Per sincronizzare il duty cycle, all'interno di ogni beacon è presente l'informazione su quando sarà il beacon seguente e questo accenderà la radio appena prima.

Se un dispositivo non deve inviare/ricevere niente, spegne la radio fino al superframe successivo.

Nello standard c'è una $aBaseSuperframeDuration = 960 \text{ symbols}$, quindi ogni beacon avrà una durata multipla di questa unità base. Due parametri che determinano il duty cycle:

- **Beacon Order BO:** determina il beacon interval 0-14, il quale dura

$$BI = aBaseSuperframeDuration \cdot 2^{BO} \text{ symbols}$$

- **Superframe Order SO:** determina la durata del superframe 0-14:

$$SD = aBaseSuperframeDuration \cdot 2^{SO} \text{ symbols}$$

960 simboli sono $\sim 15.3ms$ in banda $2.4GHz$. Il duty cycle è dato da

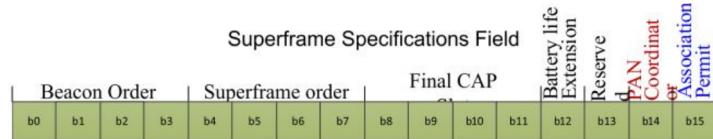
$$Duty - Cycle = \frac{2^{SO}}{2^{BO}}$$

Quindi, un sensore, potrebbe accendere la radio per circa $15ms$ per poi spegnere la radio fino alla trasmissione successiva, che potrebbe essere dopo 15 minuti. In realtà si riaccende un pochino prima del beacon per tenere conto di una possibile deriva del clock.

Beacon Frame: Un Beacon Frame è composto da

2 Bytes	1 Bytes	2 Bytes	2/8 Bytes	2 Bytes	variable	variable	variable	2 Bytes
Control Frame	Beacon Seq. No. (BSN)	Source Pan ID	Source Address	Superframe Specs	GTS Field	Pending Address Field	Beacon Payload	Frame check Sequence (FCS)

Il campo Superframe Specs è a sua volta diviso in



Dove:

- Beacon Order: 4 bit per il beacon interval, la frequenza con cui vengono trasmessi i beacon
- Superframe Order: 4 bit, definisce la durata della parte attiva del superframe
- Final CAP: 4 bit, stabilisce dove termina il periodo CAP all'interno della parte attiva
- Battery Life Extension: 1 bit, se a 1 abilita un meccanismo di risparmio energetico
- Riservato: 1 bit
- PAN Coordinator: 1 bit, indica se chi trasmette il beacon è il coordinatore o un router
- Association Permit: 1 bit, indica se altri dispositivi possono associarsi alla rete tramite il dispositivo che trasmette il beacon

Gli altri campi all'interno del beacon sono:

- Control Frame: specifica il tipo di frame ed altri parametri relativi alle caratteristiche della trasmissione
- Beacon Sequence Number: valore incrementale per identificare il singolo beacon
- Source PAN ID: indica l'ID di rete del dispositivo che trasmette il beacon, identifica l'appartenenza del beacon ad una specifica rete
- Source Address: Indirizzo del dispositivo che trasmette il beacon
- Guaranteed Time Slot (GTS) Field: specifica i time slot riservati per la trasmissione di alcuni dispositivi collision free
- Pending Address Field: indica se il coordinatore ha dati in sospeso per uno o più dispositivi
- Beacon Payload: può contenere informazioni aggiuntive specifiche del livello di rete ZigBee o altre informazioni proprietarie del produttore
- Frame Check Sequence (FCS): campo per il controllo dell'integrità (CRC)

Se un dispositivo legge il GTS e il Pending Address e capisce di “non aver nulla da fare”, può spegnere la radio fino al prossimo beacon.

Il superframe viene diviso in **slot con diversi tipi di accesso**:

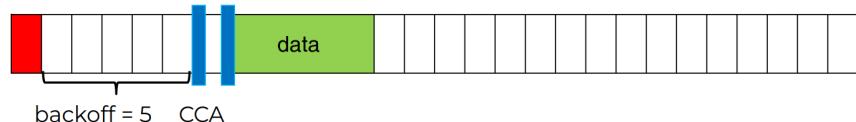
- **Contention Access Period CAP** (valore di default 16): Accesso al canale usando CSMA/CA
- **Contention Free Period CFP** (da 0 a 7 slot): Intervallo per le comunicazioni con banda riservata tramite Guaranteed Time Slot

Slotted CAP CSMA/CA: Canale a contesa, Carrier Sense Multiple Access con Collision Avoidance. Per capire quando è libero il canale viene fatto un **Clear Channel Assessment** (CCA) per brevi periodi (8 simboli). Ci sono dei parametri che determinano come questo viene fatto:

- NB = Numero di Backoff, inizialmente 0, aumenta di 1 se il canale è occupato
- BE = Backoff Exponent, indica il range del periodo di backoff $[0, 2^{BE} - 1]$
- CW = Contention Window, indica il numero di slot liberi consecutivi necessari prima di cominciare a trasmettere

Ogni contention slot è 20 simboli.

Viene scelto un intero casuale nell'intervallo determinato dal BE , si aspetta quel numero di contention slot, e poi vengono fatti CW CCA, se dopo gli assessment il canale è libero il dispositivo comincia a trasmettere. I CCA sono ravvicinati tra loro.



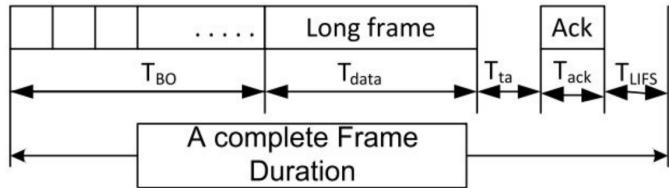
Se durante uno dei CCA viene ricevuta la trasmissione di un altro dispositivo viene allargata la finestra del random backoff (“siamo un po’ meglio aspettare per essere sicuri”), incrementando BE e NB , prima di fare un altro random backoff e tentativi di CCA. Dopo 4 tentativi ($NB = 4$) il livello MAC dichiara transmission failure.

Se il numero di contention slot in CAP non è sufficiente (ho meno slot rispetto al valore casuale che ho estratto), il conteggio viene interrotto e ripreso al superframe successivo (per evitare che un dispositivo sfortunato non trasmetta mai).

In qualsiasi caso, tutta la comunicazione deve terminare prima degli slot GTS, tutto deve essere incluso nel CAP. Se un dispositivo non avrebbe tempo di trasmettere i dati che deve (troppi pochi slot rimanenti), la trasmis-

sione viene rimandata al superframe successivo.

Una trasmissione completa diventa:



Tempo di backoff T_{BO} , un frame di dati T_{data} , un tempo di turn around T_a (aspettare che la radio passi da TX a RX), ricezione dell'ack ed un tempo per chiudere la telecomuncazione T_{LIFS} (long inter-frame space).

Unslotted Non Beacon Mode: Nella modalità senza beacon i dispositivi accedono al canale usando CSMA/CA senza i vincoli di slot. Non c'è sincronizzazione, il tempo è continuo, il controller è più semplice.

Sostanzialmente si ripete la fase di backoff e CSMA/CA finché non il dispositivo non riesce a trasmettere. Non essendoci sincronizzazione, tutto ciò che non è end device deve essere sempre attivo (radio sempre accesa, non sapendo quando qualcuno trasmetterà).

3.6.3 Livello di rete

Il livello di rete (Network Layer) di ZigBee (definito nello standard ZigBee, **sopra** l'IEEE 802.15.4) si occupa della gestione e del mantenimento della topologia di rete e delle operazioni di routing.

In particolare, gestisce formazione della rete, indirizzamento sopra al MAC e la topologia (supportando la riconfigurazione). Dato che ci sono trasmissioni che devono giungere a dispositivi non in connessione diretta è necessario routing, questo viene gestito a livello di rete tramite protocolli di routing mesh come **Ad-Hoc On Demand Distance Vector AODV**.

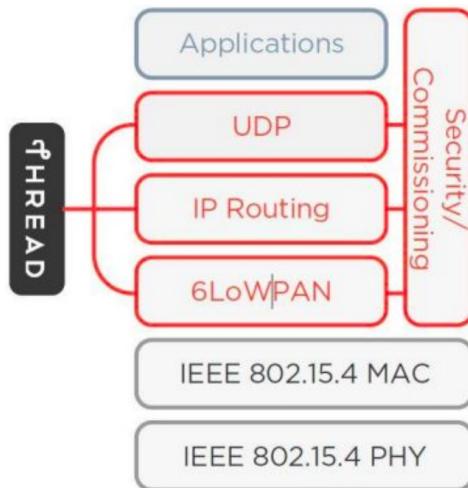
3.6.4 ZigBee Device Object ZDO

Posizionato sopra il livello di rete, definito nello standard ZigBee. Definisce **il ruolo del dispositivo**, permette la scoperta di nuovi dispositivi e le loro funzionalità. Inoltre fornisce un'interfaccia comune per le applicazioni.

Stabilisce come un dispositivo si inserisce nella rete, come scopre gli altri nodi e come gestisce la sicurezza e le funzionalità di base. Ogni nodo ZigBee ha il proprio ZDO che fornisce servizi di gestione e supervisione, rendendo possibile l'interoperabilità fra dispositivi di diversi produttori.

3.7 Matter & Thread

Thread ha il livello fisico e MAC secondo standard 802.15.4, ma sopra usa uno stack



- Standard 6LoWPAN, compressione header, supporto a rete mesh
- IP Routing, indirizzamento IPv6, distance vector routing, costi dei link variabili in base a RSSI (Received Signal Strength Indicator)
- UDP

Rete Thread: Cambiano un po' le capacità dei dispositivi, ci sono:

- **Routing Full Thread Device:** possono essere
 - **router:** effettua routing e fornisce servizi di accesso e sicurezza (NoSleep, può essere “degradato” a Router-Eligible End Device REED)
 - **leader:** un router con funzionalità aggiuntive che può eleggere/destituire REED
- **Non routing Full Thread Device:** si dividono in
 - REED
 - Full End Device FED, non possono essere eletti router

I Non Routing Minimal Thread Devices sono dispositivi con requisiti HW minori:

- Minimal End Device (MED): comunica solo con il router genitore e radio sempre attiva
- Sleepy End Device (SED): comunica solo con il router genitore e duty-cycle
- Synchronized Sleepy End Device (SSED): comunica solo con il router genitore e duty-cycle secondo intervalli schedulati

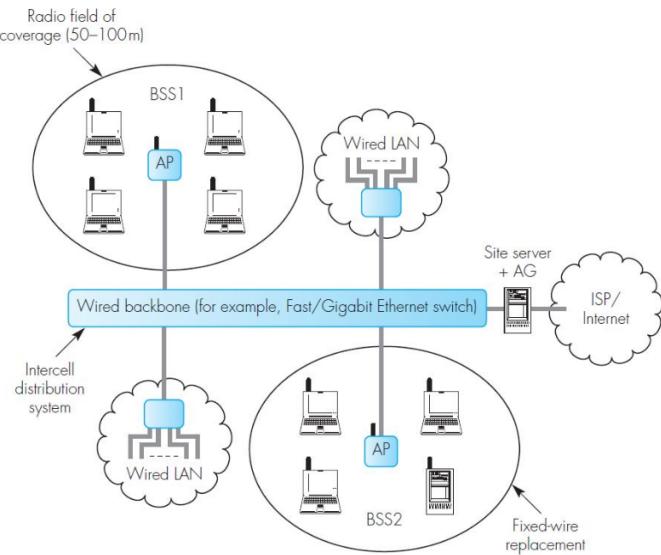
Border router: Sono dei dispositivi di tipo Full Thread Device che forniscono connettività verso le altre reti con un livello fisico diverso (Wi-Fi, Ethernet, ...). Offre funzionalità di routing all'esterno della rete thread.

4 Wireless Local Area Network WLAN

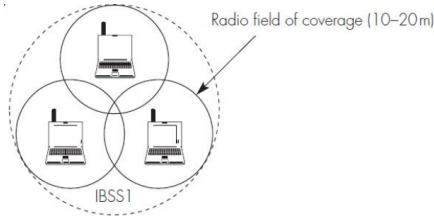
Lo standard considerato da adesso è 802.11. I requisiti generali sono:

- Throughput maggiore possibile
- elevato numero di nodi, gestiti da più celle
- connessione verso la dorsale (backbone) cablata
- Raggio 100-300m
- Utilizzo efficiente (non estremo) della batteria
- Più WLAN devono poter coesistere
- Operare nelle bande di frequenza unlicensed
- Configurazione dinamica (selezione canali, autenticazione)

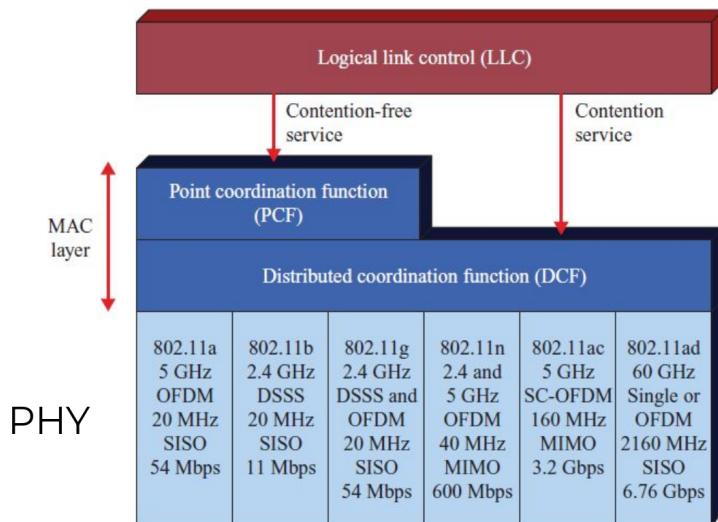
Wireless Fidelity WiFi: Si ha una rete con **uno o più Access Point AP**, coordinata da **Point Coordination Function PCF** (ovvero si ha un solo punto di coordinamento, l'AP). Un **Basic Service Set BSS** identifica la cella o rete WiFi (nome/caratteristiche della rete).



Si può anche avere una **rete Ad-Hoc**, senza una PCF, ma con una **Distributed Coordination Function DCF**, con un **Independent Basic Service Set IBSS**



Architettura dei protocolli:



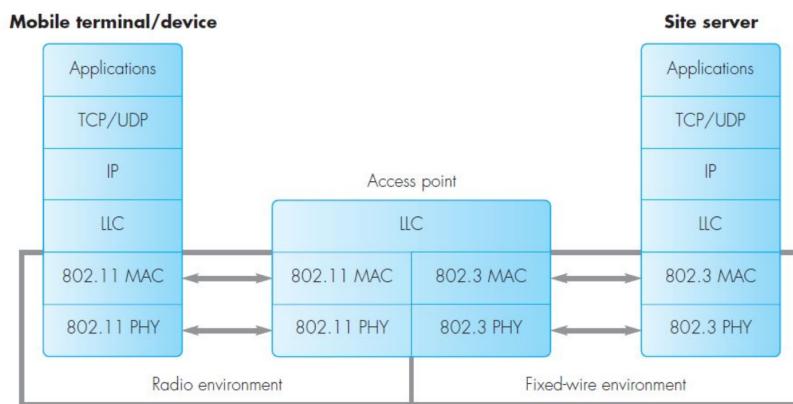
Mostrate in ordine da sinistra a destra, a livello fisico ci sono le versioni di WiFi, anche se l'ultimo rappresentato non è WiFi 6 (quello è 802.11ax). Sopra c'è il livello MAC, poi il Logical Link Control che permette di avere servizi.

Il throughput diverso (visibile [in questa tabella](#)) è determinato da dimensione del canale, aumentata nel tempo, frequenze utilizzate, modulazioni con più bit per symbol e MIMO (Multiple Input Multiple Output, fino a 16 antenne diverse per fare input/output).

Servizi Logical Link Control LLC: Offre principalmente tre servizi:

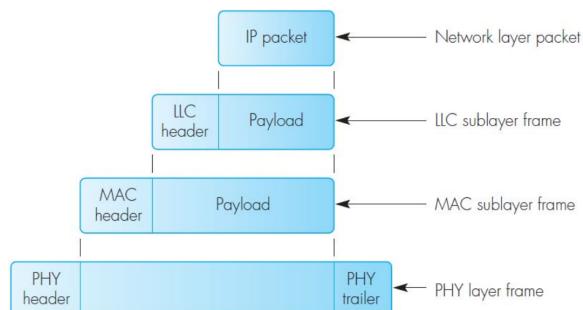
- **Unacknowledged connectionless service:** consegna non garantita, datagram indipendenti, senza controllo di errori o di flusso; cosa capita capita
- **Connection-mode service:** canale punto-punto, correzione degli errori e controllo di flusso; connessione affidabile
- **Acknowledged connectionless:** datagram indipendenti, acknowledged datagram; senza connessione, ma con ack

Infrastruttura 802.11:



Il livello LLC è comune a 802.X.

Livelli Pacchetti: La struttura per l'incapsulamento dei livelli è



Ovvero, fisico, MAC, LLC, poi pacchetto di rete.

4.1 Sottolivello MAC

Abbiamo un canale *molto* inaffidabile (rispetto ad un canale cablato), con molte informazioni da trasmettere, e di conseguenza frame più complessi (rispetto a 802.3). Il frame di MAC 802.11 ha un payload massimo di $2304B$.

Il sottolivello MAC offre due servizi:

- **Servizio dati asincrono:** non ha garanzie sul delay e quindi sulla QoS, best effort
- **Servizio time-bounded:** offre garanzie sul delay, disponibile solo in presenza di un coordinatore (AP)

4.1.1 Distributed Coordination Function DCF

Opera in **CSMA/CA**: l'accesso al canale deve essere regolato aspettando del tempo per poter trasmettere. 802.11 prevede diversi tempi di attesa a seconda della tipologia di dati da trasmettere.

Definizioni:

- **Slot time:** una unità base di tempo (interna al dispositivo), non si tratta di una suddivisione temporale; tiene conto del ritardo di propagazione e della tipologia di trasmettitore utilizzato (tipo di WiFi fisico usato, es: $20\mu s$ per 802.11b)
- **Short Inter-frame Spacing SIFS:** l'intervallo più breve di attesa usato per messaggi ad alta priorità, altra unità base di tempo; la durata dipende dalla tipologia di trasmettitore
- **DCF Inter-frame Spacing DIFS:** intervallo di tempo più lungo usato per messaggi a bassa priorità best effort: $SIFS + 2 * slot_time$
- **PCF Inter-frame Spacing PIFS:** intervallo di tempo intermedio per time-bounded: $SIFS + 1 * slot_time$

Nel caso di trasmissione con canale libero:

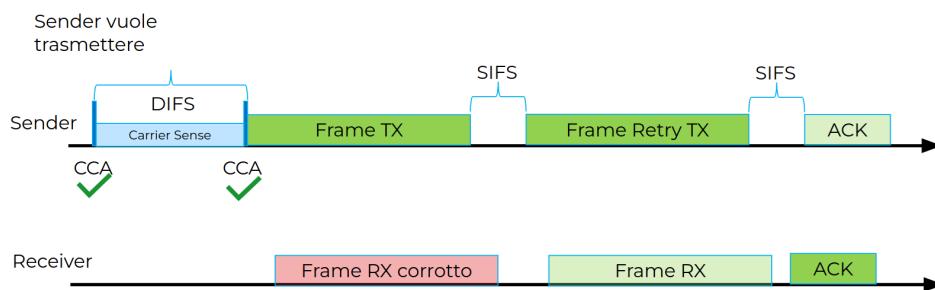
- il sender inizia ad ascoltare il canale:
- fa un Clear Channel Assessment CCA
- ascolta per un tempo *lungo* (ovvero DIFS) il canale
- fa un altro CCA

Se non ha sentito nulla tra il primo ed il secondo CCA trasmette.

Se **non è necessario ack**, una volta terminata la trasmissione il canale è libero.

Se **necessario l'ack**, l'attesa dell'acknowledgement ha durata *breve* SIFS (più breve del tempo per i CCA, altrimenti potrebbe andare in conflitto con CCA di altri dispositivi); dal RX l'ack viene inviato il prima possibile (giusto il tempo di turnaround e di preparare il pacchetto).

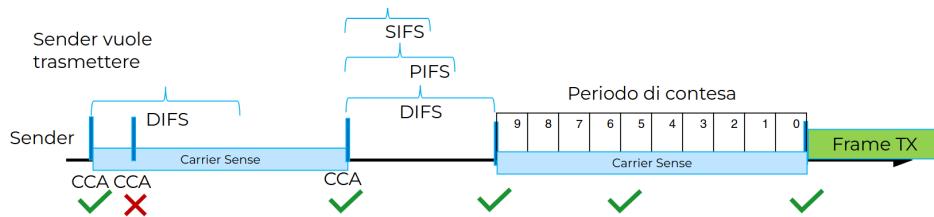
Se il **frame viene corrotto** prima della ricezione, mancherà l'ack, il TX aspetta tempo SIFS e se non riceve niente assume che la trasmissione non sia andata a buon fine e ritrasmette subito lo stesso frame; “subito” perché ha ottenuto l’accesso esclusivo al canale e lo tiene in maniera esclusiva finché la trasmissione non è terminata; il tempo è breve per evitare che altri “si intromettano”. Il rilascio del canale avviene solo a trasmissione completata e ack ricevuto. Da standard 802.11 è previsto un massimo di tentativi.



Se il **canale è occupato**, ovvero durante il tempo di attesa DIFS viene ricevuto un segnale, fallisce il CCA ed il dispositivo ascolta fino al termine della trasmissione dell’altro sender.

Quando il canale è di nuovo libero (nuovo CCA), si aspetta un periodo di tempo DIFS, PIFS o SIFS, deciso in base alla priorità del messaggio, prima di avere un periodo di contesa (tutti i dispositivi che devono trasmettere aspettano il momento di fine trasmissione).

Durante il periodo di contesa il dispositivo aspetta un numero random di slot_time da attendere (Binary Exponential Backoff). Carrier sense durante tutto il priodo di backoff.



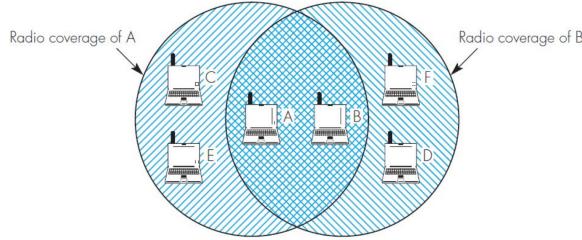
Da notare come la radio rimanga sempre accesa, non ci sono più requisiti di batteria come in Bluetooth o ZigBee.

Se durante il periodo di contesa il **canale diventa occupato**, due opzioni:

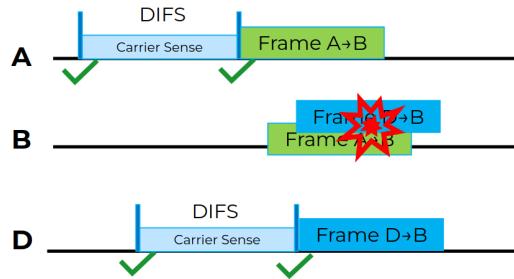
1. Riparto dalla contesa (con intervallo più ampio) al prossimo ciclo; non equa nei confronti delle stazioni che hanno “perso”, rischio attesa infinita
2. Blocco il timer al valore in cui era arrivato nel momento in cui è stato rilevato il canale occupato e nel **turbo successivo riparto** da quel valore

4.1.2 Problema del terminale nascosto

Il meccanismo di carrier sense funziona se l'altro dispositivo che comincia a trasmettere può essere rilevato. Ad esempio, nel caso



A e D non si possono sentire in quanto fuori dal rispettivo raggio di copertura. Se entrambi volessero trasmettere a B vedrebbero il canale libero nello stesso momento, causando una collisione.



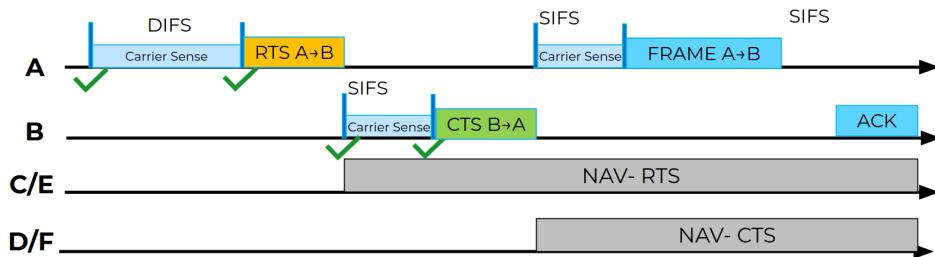
Per risolvere, dopo aver fatto carrier sense, il sender invia una **Request to Send RTS** contenente sorgente e destinazione della richiesta oltre alla durata stimata da RTS ad ack finale.

Il RTS viene ricevuto da tutti i terminali nel raggio di copertura del sender, i quali sanno che la richiesta non è per loro e usano le informazioni sul tempo previsto per allocare un **Network Allocation Vector NAV**, ovvero un tempo nella quale sanno che non potranno trasmettere.

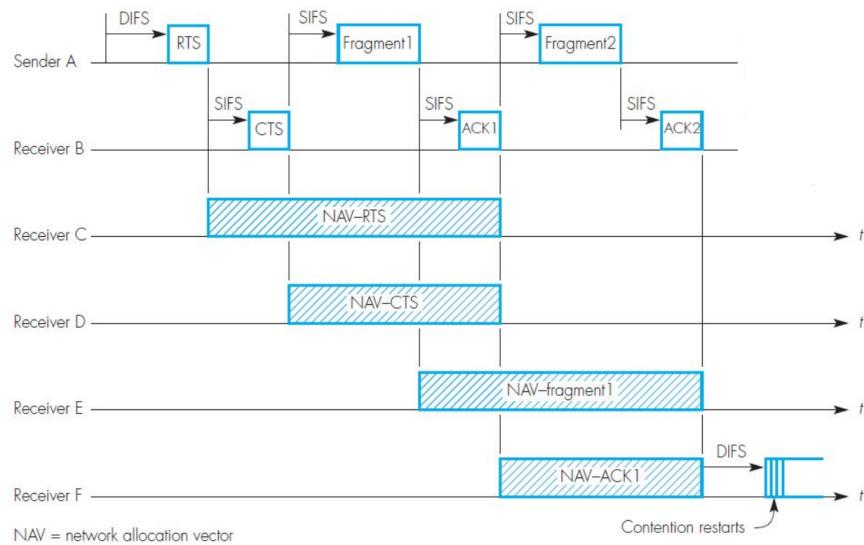
Il destinatario, se è libero, risponderà (dopo tempo SIFS, per evitare che comincino altre comunicazioni nel frattempo) con un **Clear to Send CTS**, contenente sorgente, destinazione ed il tempo rimanente fino alla fine della trasmissione.

Il CTS viene ricevuto da tutti i terminali nel raggio di del destinatario, i quali allocheranno un **NAV** per il tempo indicato nel CTS (ovviamente minore di quello del RTS, è passato del tempo). Vengono a conoscenza del fatto che un altro nodo all'esterno del loro raggio di copertura vuole comunicare con un nodo a loro visibile, quindi non tentano nemmeno di accedere al canale.

Dopo che il sender originale ha ricevuto il CTS aspetta SIFS per poi inviare il frame ed aspettare di ricevere l'ack per terminare la trasmissione.



Frammentazione: Il canale radio è molto più sensibile ad interferenza e rumore. Considerando la dimensione della frame Ethernet (1522 byte) è molto probabile che ogni frame abbia errori; meglio **ridurre la dimensione della frame MAC**. Frame LLC viene suddivisa in frammenti più piccoli la cui dimensione è variabile in base alle condizioni del canale.

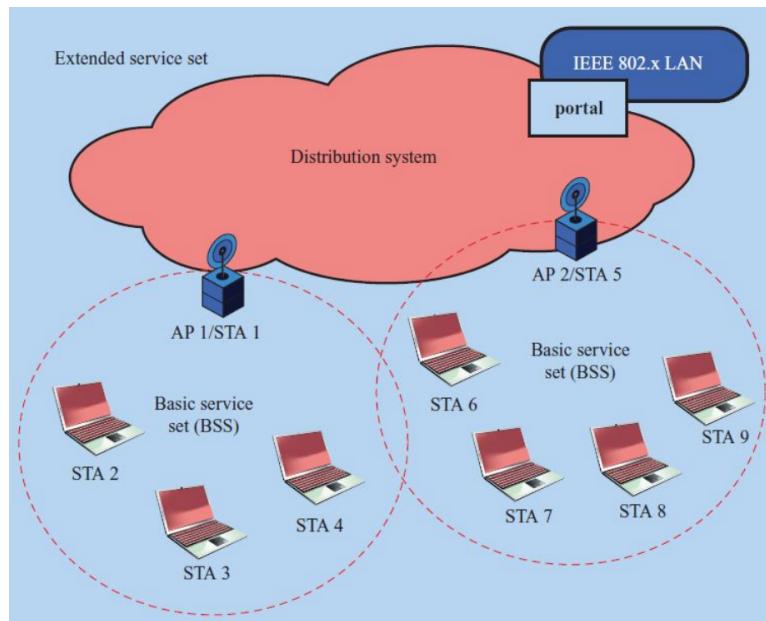


All'interno di ogni frame “frammentato” si inseriscono informazioni riguardo al NAV per i dispositivi non direttamente coinvolti nella comunicazione.

La frammentazione e correzione dei dati viene fatta a livello MAC, tra dispositivo e AP, dove il ritardo dovuto alla correzione è minimo. Si potrebbe lasciare la correzione dei dati al livello superiore (TCP), ma sarebbe il destinatario finale e non l'AP ad accorgersi dell'errore, allungando di molto i tempi di ritrasmissione.

4.2 802.11 Con Infrastruttura

Nel caso più semplice si ha un solo AP con il relativo Basic Service Set BSS, l'insieme di stazioni controllate dal singolo coordinatore. Si può anche avere un Extended Service Set ESS, ovvero un insieme di più BSS interconnessi tramite un sistema distribuito (DS).



Il portale è un router/bridge che collega il sistema distribuito alla LAN. ESS viene visto come un unico BSS a livello LLC per funzionalità di roaming (muoversi nella rete e rimanere collegato) tra AP diversi (overlapping almeno 10% per garantire continuità).

4.2.1 Point Coordination Function

In presenza di un AP, tutti i frame passano per l'AP. Questo permette di avere **servizi time-bounded**, con garanzie sul delay, non possibili con DCF (il random backoff non ha garanzie). Nella modalità PCF, l'AP controlla l'accesso al canale radio:

1. Tutto il traffico passa dall'AP
2. Le stazioni associate ad AP usano DCF con tempistiche SIFS e DIFS per accedere al canale
3. AP usa PIFS

In questo modo AP riesce ad “impossessarsi” del canale radio prima delle stazioni in attesa.

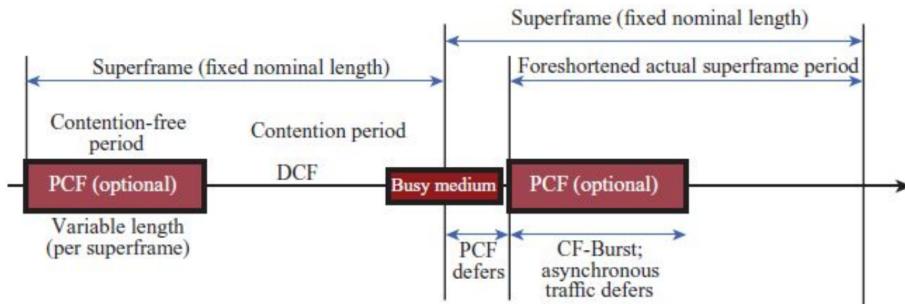
AP manda messaggi periodici (10-100s) detti **beacon frame** che sono frame di gestione contenenti

1. Parametri operativi PHY (bit rate & Modulation Coding Scheme)
2. Sincronizzazione (usato nelle prime versioni 802.11 che usavano FHSS)
3. Supporto a PCF con le relative informazioni
4. Invito per le nuove stazioni che non sono ancora associate

Ovvero, una rete manda dei beacon per “farsi scoprire” e comunicare le proprie caratteristiche per le nuove associazioni.

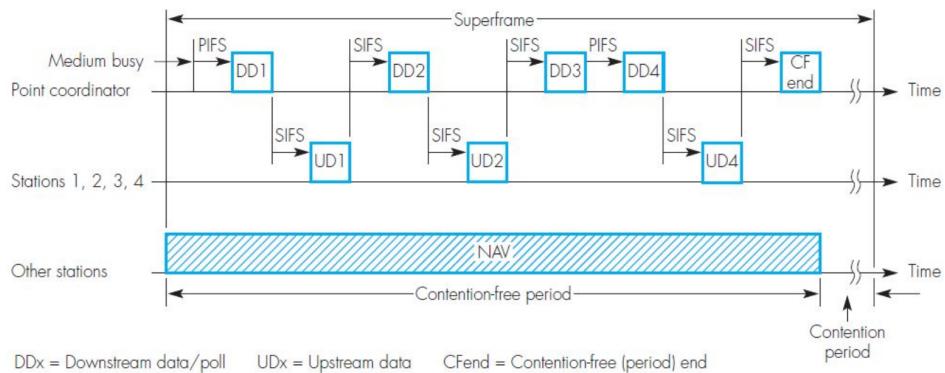
Il tempo è diviso in blocchi (superframe), all'interno dei quali si ha una divisione in due periodi:

- una parte **senza contesa** opzionale, ma necessario per servizi time bounded
- accesso **a contesa** (sempre presente)



Se il canale radio è occupato oltre il limite del superframe il tempo non verrà recuperato (si aspetta).

Quindi la PCF ha un funzionamento del tipo:



Al termine della comunicazione precedente, tutti i dispositivi attendono DIFS ma l'AP aspetta PIFS, quindi prende il lock sul canale prima degli altri, iniziando il periodo senza contesa. In seguito invia il "permesso di trasmettere" per ogni trasmissione necessaria, aspettando SIFS tra una e l'altra (per non rischiare di perdere il lock sul canale). Al termine si manda un Contention Free End per marcare la fine del periodo senza contesa.