

# Reti Wireless E Mobili

Massimo Perego

## Indice

<b>1 Principi di Teoria della Trasmissione</b>	<b>6</b>
1.1 Rappresentazione dei segnali . . . . .	7
1.2 Relazione tra Bandwidth e Data Rate . . . . .	9
1.2.1 Teorema di Nyquist sulla banda . . . . .	11
1.2.2 Decibel . . . . .	12
1.2.3 Rapporto segnale rumore SNR . . . . .	13
1.2.4 Shannon Capacity Formula . . . . .	13
1.3 Multiplexing . . . . .	14
1.3.1 Frequency Division Multiplexing FDM . . . . .	14
1.3.2 Time division Multiplexing TDM . . . . .	15
<b>2 Comunicazione Wireless</b>	<b>16</b>
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 . . . . .	24
2.3.1 Modulazione e Codifica . . . . .	24
2.3.2 Bit Error Rate Curve . . . . .	27
2.3.3 Forward Error Correction . . . . .	28
2.3.4 Orthogonal Frequency Division Multiplexing OFDM .	31
2.4 Spread Spectrum . . . . .	32
2.4.1 Frequency Hopping Spread Spectrum FHSS . . . . .	33
2.4.2 Direct Sequence Spread Spectrum DSSS . . . . .	34
2.4.3 Code Division Multiple Access CDMA . . . . .	35
<b>3 Wireless Personal Area Network WPAN</b>	<b>44</b>
3.1 ISM Band . . . . .	44
3.2 Pulse Code Modulation PCM . . . . .	44

3.3	802.15.x . . . . .	45
3.4	Bluetooth . . . . .	45
3.4.1	Architettura dei protocolli . . . . .	46
3.4.2	Piconet & Scatternet . . . . .	49
3.4.3	Bluetooth Radio . . . . .	50
3.4.4	Baseband . . . . .	53
3.4.5	Link Manager Protocol . . . . .	56
3.4.6	Logical Link Control and Adaptation Protocol L2CAP	59
3.4.7	Service Discovery Protocol SDP . . . . .	60
3.5	Bluetooth Low Energy BLE . . . . .	61
3.5.1	Architettura . . . . .	62
3.5.2	Classi di potenza . . . . .	62
3.5.3	BLE Radio (PHY) . . . . .	62
3.5.4	BLE State Machine . . . . .	63
3.5.5	Advertising . . . . .	64
3.5.6	Generic Attribute Profile GATT . . . . .	64
3.5.7	General Access Protocol GAP . . . . .	65
3.6	ZigBee . . . . .	67
3.6.1	Livello Fisico 802.15.4 (PHY) . . . . .	69
3.6.2	Livello Data Link 802.15.4 (MAC) . . . . .	70
3.6.3	Livello di rete . . . . .	76
3.6.4	ZigBee Device Object ZDO . . . . .	76
3.7	Matter & Thread . . . . .	77
<b>4</b>	<b>WiFi 802.11</b>	<b>79</b>
4.1	Sottolivello MAC . . . . .	82
4.1.1	Distributed Coordination Function DCF . . . . .	82
4.1.2	Problema del terminale nascosto . . . . .	85
4.2	802.11 Con Infrastruttura . . . . .	87
4.2.1	Point Coordination Function . . . . .	88
4.2.2	Formato Frame MAC . . . . .	90
4.3	Orthogonal Frequency Division Multiple Access OFDMA . . . . .	92
4.3.1	Downlink DL-OFDMA . . . . .	95
4.3.2	Uplink UP-OFDMA . . . . .	96
4.4	WLAN Security . . . . .	98
4.5	WiFi Protected Setup WPS . . . . .	101
4.6	802.11e EDCA Enhanced Distributed Channel Access . . . . .	102
4.7	802.11p & Wave - V2V . . . . .	102
<b>5</b>	<b>Ad Hoc Distance Vector Routing Protocol AODV</b>	<b>104</b>

5.1	Tabelle di Routing . . . . .	106
5.2	RREQ . . . . .	108
5.2.1	Expanding Ring Search . . . . .	109
5.2.2	RREQ Processamento e Inoltro . . . . .	110
5.3	RREP . . . . .	111
5.3.1	RREP Processamento e Inoltro . . . . .	113
5.3.2	Hello Message . . . . .	114
5.4	Mantenimento della Connattività Locale . . . . .	115
5.4.1	RERR Processamento e Inoltro . . . . .	116
5.4.2	Local Repair . . . . .	117
5.4.3	Reboot . . . . .	117
<b>6</b>	<b>Mobile Network</b>	<b>118</b>
6.1	Introduzione alle reti mobili . . . . .	118
6.2	Organizzazione Geometrica delle Celle . . . . .	120
6.2.1	Aumento della capacità per migliorare la scalabilità .	121
6.3	Architettura . . . . .	122
6.4	Operazioni . . . . .	123
6.5	Ambiente . . . . .	125
6.5.1	Deployment . . . . .	125
6.6	Handoff/Handover . . . . .	126
6.7	Duplex . . . . .	128
6.8	GSM Mobile Station (MS) . . . . .	128
6.8.1	SIM Card . . . . .	129
6.9	Story Time: Prima del 4G . . . . .	130
6.9.1	Global System for Mobile Communications GSM . . .	130
6.9.2	General Packet Radio Service GPRS & Enhanced Datarates for GSM Evolution EDGE . . . . .	131
6.9.3	GPRS Tunneling Protocol GTP . . . . .	132
6.9.4	Universal Mobile Telecommunication System UMTS .	132
6.9.5	HSDPA/HSUPA . . . . .	134
<b>7</b>	<b>Long Term Evolution 4G LTE</b>	<b>135</b>
7.1	Core Network . . . . .	136
7.1.1	Mobility Management Entity MME . . . . .	136
7.1.2	Home Subscriber Server HSS . . . . .	137
7.1.3	Packet Data Network Gateway P-GW . . . . .	137
7.1.4	Serving Gateway S-GW . . . . .	137
7.1.5	Policy Control and Charging Rules Function PCRF .	137
7.1.6	Servizi operatore . . . . .	138

7.2	E-UTRAN . . . . .	138
7.2.1	Evolved-NodeB eNodeB . . . . .	138
7.2.2	Modulazione e Codifica Trasmissione . . . . .	138
7.2.3	Riuso frequenze . . . . .	141
7.2.4	Durata Simboli . . . . .	141
7.2.5	Struttura Slot . . . . .	142
7.2.6	Duplex . . . . .	142
7.2.7	Orthogonal Frequency Division Multiple Access OFDMA	144
7.2.8	eNodeB Scheduler . . . . .	145
7.2.9	Velocità per UE . . . . .	145
7.2.10	Collegamento alla Core Network . . . . .	146
7.2.11	Tracking Area . . . . .	147
7.2.12	Interfaccia X2 . . . . .	147
7.3	Architettura . . . . .	148
7.3.1	Control Plane . . . . .	148
7.3.2	User Plane . . . . .	152
7.3.3	GPRS Tunneling Protocol GTP . . . . .	153
7.4	LTE EPS Bearers . . . . .	154
7.4.1	Bearer Multipli . . . . .	155
7.5	Procedura di Collegamento alla rete operatore . . . . .	157
7.6	Procedure di Handover . . . . .	159
7.6.1	Handover S1 . . . . .	160
7.6.2	Handover X1 . . . . .	161
<b>8</b>	<b>5G</b>	<b>164</b>
8.1	Software Defined Networking SDN . . . . .	167
8.2	Network Function Virtualization NFV . . . . .	169
8.2.1	Architettura NFV . . . . .	169
8.3	Centralized-RAN C-RAN e Virtual-RAN V-RAN . . . . .	172
8.4	Mobile Edge Computing MEC (ETSI) . . . . .	174
8.5	Network Slicing . . . . .	175
8.6	Architettura . . . . .	176
8.6.1	LTE CUPS (Control User Plane Separation) . . . . .	176
8.6.2	Divisione dei Plane . . . . .	176
8.6.3	Network Slices . . . . .	179
8.6.4	5G e MEC . . . . .	180
8.6.5	5G RAN - 5G NR (New Radio) . . . . .	181
<b>9</b>	<b>Comunicazione Satellitare</b>	<b>182</b>
9.1	Geometria del link satellitare . . . . .	182

9.2	Orbite . . . . .	183
9.2.1	Geostationary Earth Orbit GEO . . . . .	183
9.2.2	Low Earth Orbit LEO . . . . .	184
9.2.3	Medium Earth Orbit MEO . . . . .	184
9.2.4	Costellazione . . . . .	185
9.3	Architettura . . . . .	185
9.3.1	Allocazione frequenze . . . . .	186
9.4	Topologie di rete . . . . .	186
9.5	Medium Access Control MAC . . . . .	187
9.6	Integrated Satellite - Terrestrial Networks and 5G/6G NTN Technology . . . . .	188
9.6.1	Architetture possibili . . . . .	188
9.6.2	Opzioni di integrazione . . . . .	189

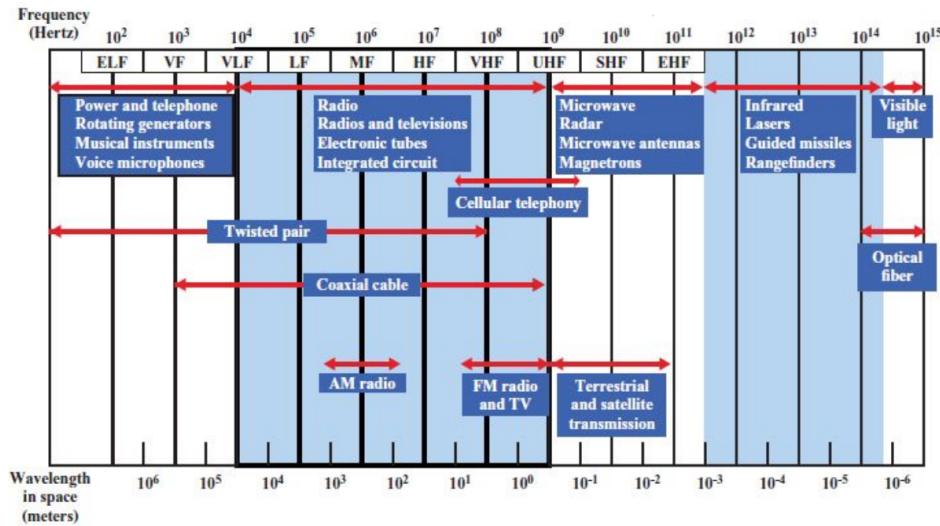
## 2 Comunicazione Wireless

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

Problemi:

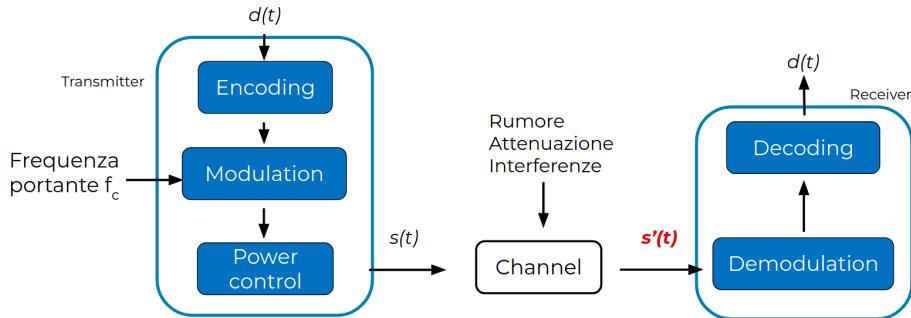
1. Se tutti i dispositivi trasmettessero in banda base, tutte le comunicazioni radio farebbero interferenza l'una con l'altra
2. Più è bassa la frequenza più grande deve essere l'antenna ( $\lambda/2$  per antenna dipole, es:  $1MHz \sim 142$  metri,  $2100MHz \sim 7$  cm)
3. Ogni range di radio frequenze 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  $f_c$**  e il trasmettitore deve de-modulare, pulire e de-codificare il segnale trasmesso. Bandwidth e data rate rimangono gli stessi, cambia solo “dove si trova” la banda.

Domande:

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

## 2.1 Encoding, symbol e symbol rate

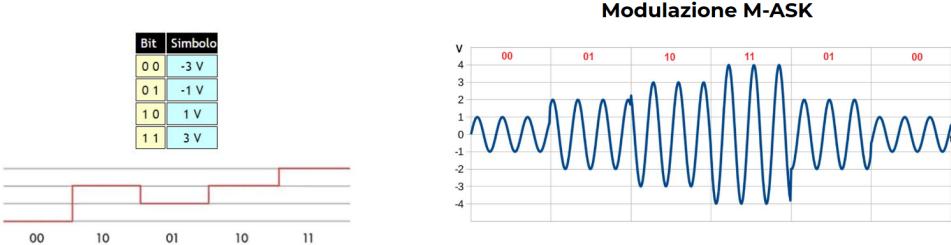
**Symbol:** Una forma d’onda, uno stato o una condizione significativa del canale di comunicazione che persiste per un intervallo di tempo fissato. Esempio: voltaggio a  $3V$  per 1 secondo.

**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**. Tipicamente, 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 scegлиmo 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.

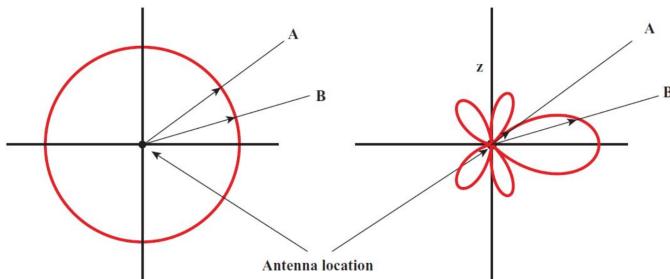
## 2.2 Trasmissione delle onde radio

**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 (sinistra), la potenza emessa è uguale in tutte le direzioni (ideale)
- Direzionale (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 viene perso tra antenna trasmittitrice (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 trasmittitore e ricevitore.

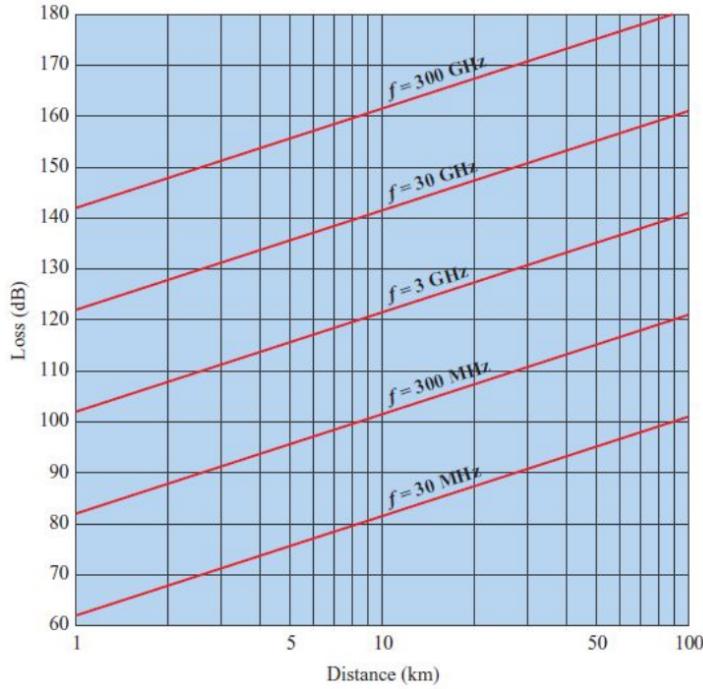
$$\frac{P_t}{P_r} = \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 d^n = \left( \frac{4\pi f}{c} \right)^2 d^n$$

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 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  $dB_i$  (dove la  $i$  sta per “isotropic”). 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.

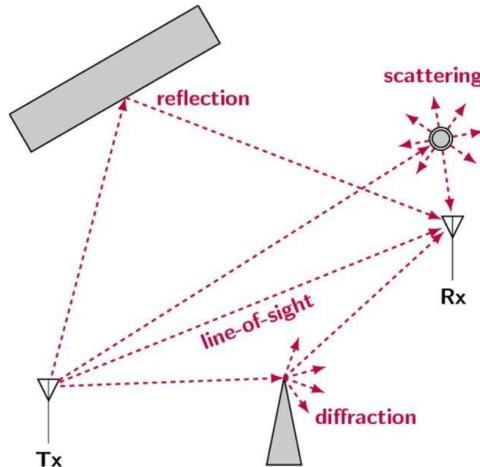
Alla perdita in free space, si sottraggono valori dipendenti dal gain di trasmittente e ricevente, abbassando il rapporto e riducendo la perdita. Chiamando  $G_{tx}$  e  $G_{rx}$  gain di trasmittitore e ricevitore, rispettivamente:

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

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:

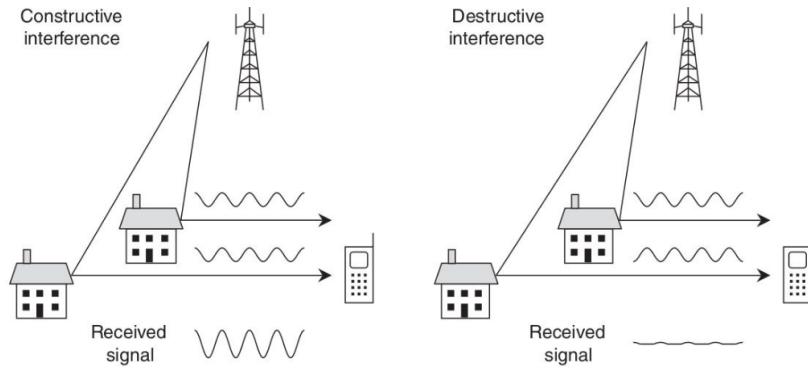
- **riflessione:** il segnale “rimbalza”, come su uno specchio,
- **scattering:** quando la lunghezza d’onda  $\lambda$  è simile a quella dell’oggetto, un raggio colpisce l’elemento e viene separato in tanti altri, sparsi in tutte le direzioni
- **difrazione:** se la lunghezza d’onda è  $\lambda \ll$  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, rappresenta una scala temporale in cui le caratteristiche del segnale saranno “costanti”

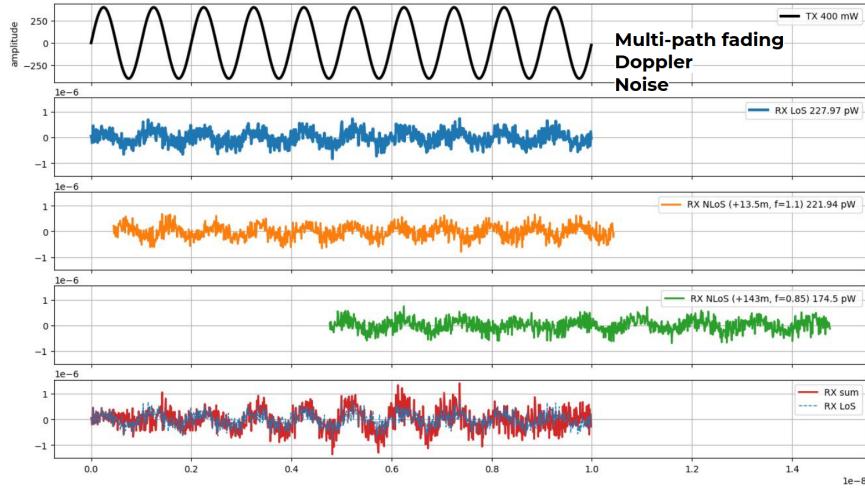
$$T_c = \frac{1}{f_D}$$

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:

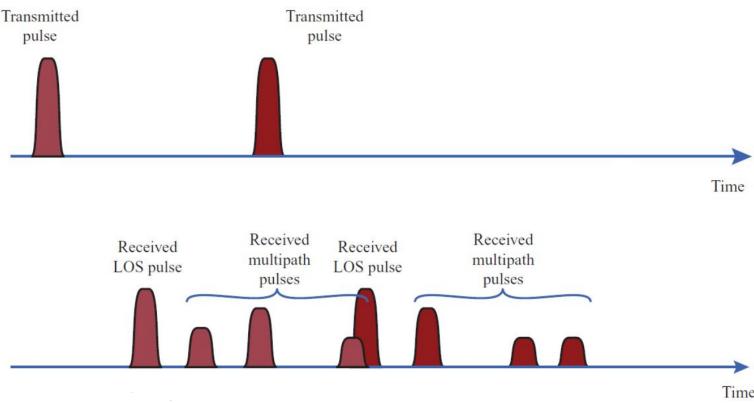


I primi 4 grafici sono:

- 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.

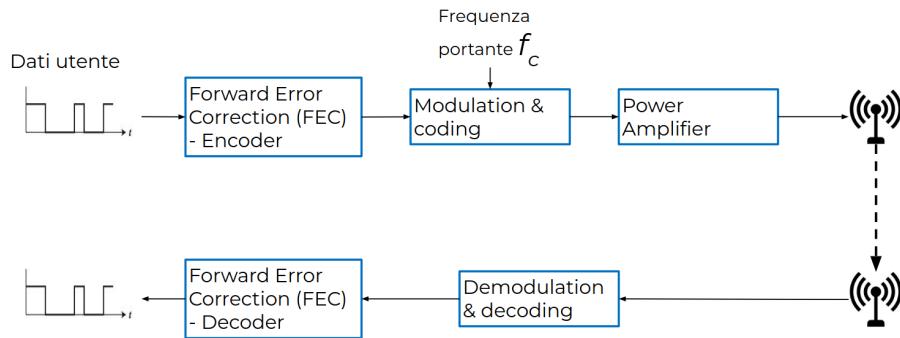


Dopo il primo impulso LoS, vengono ricevuti altri simboli per effetto del multipath e ci possono essere altri segnali che interferiscono con l'impulso LoS successivo. Si sovrappongono segnali LoS e multipath di quello precedente, causando interferenza distruttiva, interferenza inter-simbolo ISI. La distanza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

Si possono anche avere combinazioni di queste. 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:

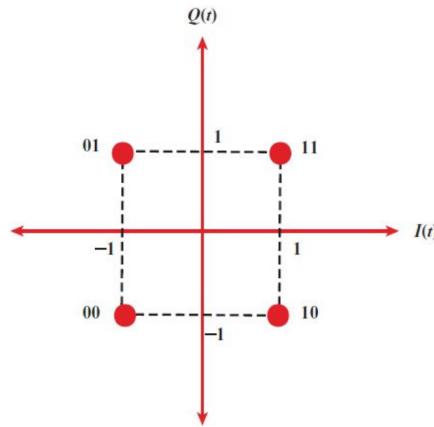
- 0 → nessun cambio di fase
- 1 → applico uno shift

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 ( $90^\circ$  tra una e l'altra), quindi 2 bit per simbolo

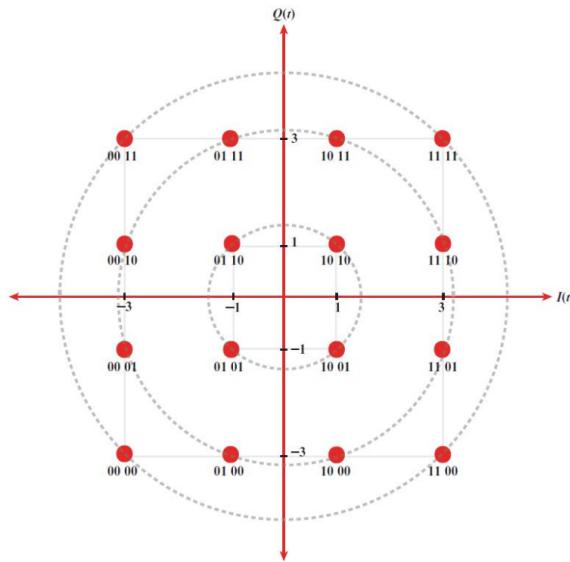
$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t + \frac{\pi}{4}) & 11 \\ A \cos(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4}) & 01 \\ A \cos(2\pi f_c t - \frac{3\pi}{4}) & 00 \\ A \cos(2\pi f_c t - \frac{\pi}{4}) & 10 \end{cases}$$

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

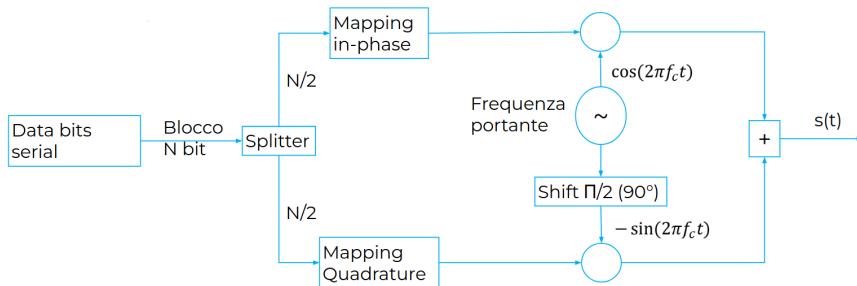


Si può vedere che ci sono 4 “posizioni”, ognuna delle quali codifica 2 bit. Si chiama “quadra” per la variazione di  $90^\circ$  tra uno e l’altro. Qua abbiamo 2 bit per symbol.

**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

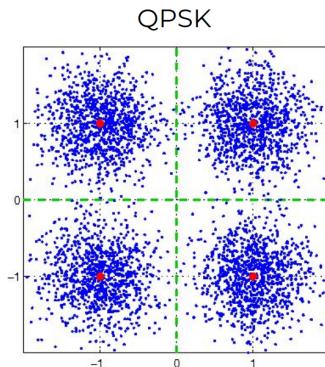
costante, ci si muove all'interno dello stesso spazio, cambia solo quanto “*densi*” sono i simboli all'interno dello spazio.

### 2.3.2 Bit Error Rate Curve

La curva di Bit Error Rate *BER* 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

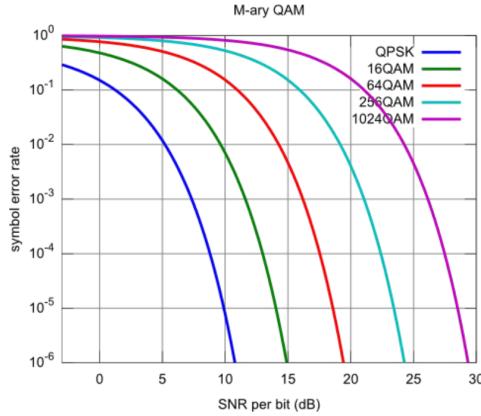
$$BER = func = \left( \frac{E_b}{N_0} \right)$$

La probabilità di sbagliare un bit, dato un certo rapporto tra densità di energia del segnale per bit e rumore. Come idea, simile al SNR. 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 troppo significativa questo potrebbe portare a un'interpretazione sbagliata.

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:** Limitarsi a una singola codifica prestabilita, sempre e comunque, sarebbe inefficiente. Un’idea potrebbe essere misurare la qualità del canale per capire quale sia la codifica migliore per quella determinata situazione.

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**: si definisce un lasso di tempo ogni quanto misurare la qualità del canale e adattare 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,  $k$  bit trasmessi per  $n$  bit da inviare (con  $k > n$ , sempre).

In questo modo, con una tabella di codeword adatta, è possibile rendere la trasmissione resiliente agli errori.



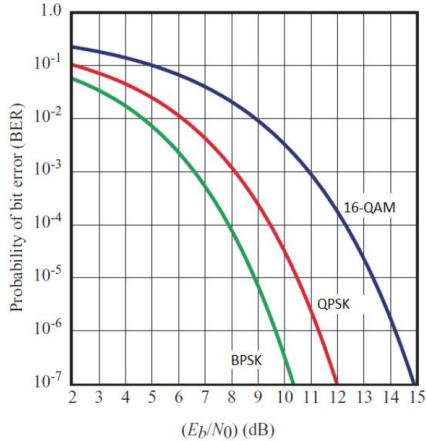
**Esempio:** Dati un  $SNR$  sul canale, un  $BER$  che si vuole garantire ed un symbol rate

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

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

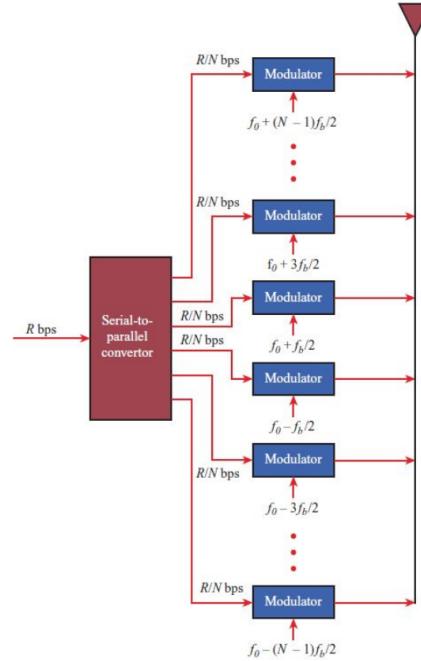
$$sym/s \cdot bit/sym \cdot coding\_rate$$

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

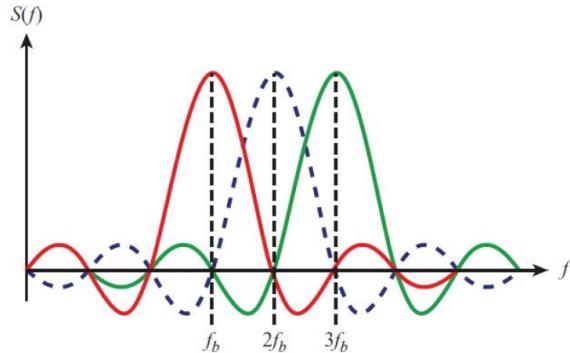
Vogliamo offrire canali differenti usando una divisione in frequenza diversa da FDM. L'obiettivo è quello di garantire lo stesso data rate che avremmo in una trasmissione in TDM ma usando una divisione in frequenza, senza usare troppa banda. Schema:



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 sub-carrier
- più robusto rispetto ai problemi di multipath perché la distanza tra un simbolo e l'altro è maggiore (ISI ridotta)

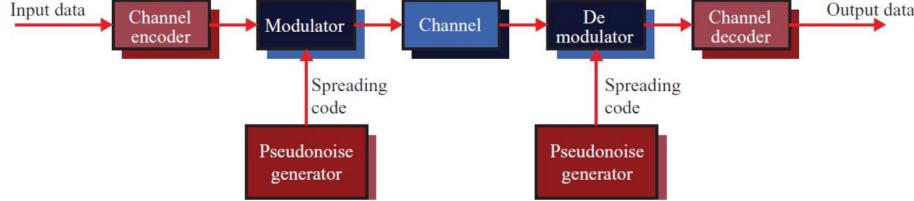
N.B.: in generale multiple access  $\neq$  multiplexing, far passare più segnali contemporaneamente è diverso da fare comunicare più utenti contemporaneamente.

**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).

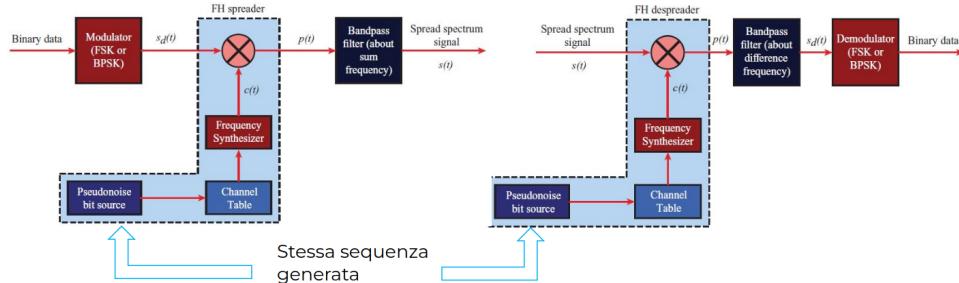
Motivazioni:

- 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.

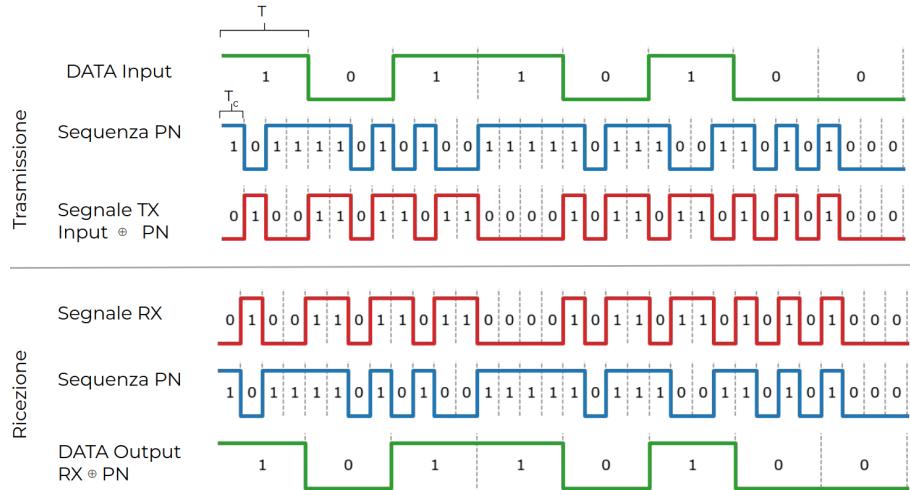
#### 2.4.2 Direct Sequence Spread Spectrum DSSS

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

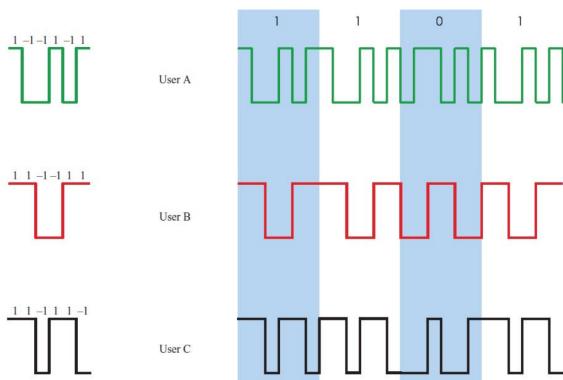
L'idea è utilizzare un canale con una certa banda a disposizione, e tutti i dispositivi possono usare la stessa banda, evitando interferenze.

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:





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).