

Reti Wireless E Mobili

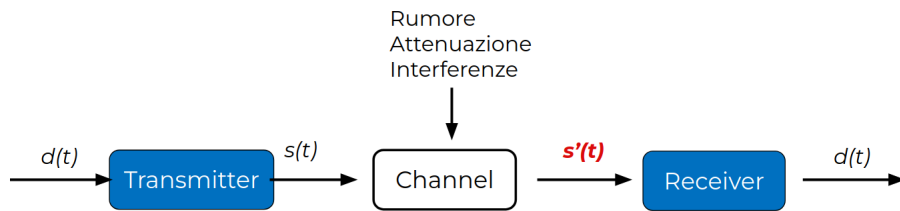
Massimo Perego

Contents

1	Principi di Teoria della Trasmissione	2
1.1	Rappresentazione dei segnali	3
1.2	Relazione tra Bandwidth e Data Rate	6
1.2.1	Teorema di Nyquist sulla banda	8
1.2.2	Decibel	10
1.2.3	Rapporto segnale rumore SNR	10
1.2.4	Shannon Capacity Formula	11
1.3	Multiplexing	13
1.3.1	Frequency Division Multiplexing FDM	13
1.3.2	Time division Multiplexing TDM	13
2	Comunicazione Wireless	14
2.1	Encoding, symbol e symbol rate	16
2.2	Trasmissione delle onde radio	17
2.2.1	Problemi con Trasmissione radio Line of Sight (LOS) .	18

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 “traduce” 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 **introdurre**:

- 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 estrapolare 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 **segnale**

- **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:

- **Ampiezza** (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 altre 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 = **frequenza fondamentale**
- kf = **armonica** ($k > 1$)

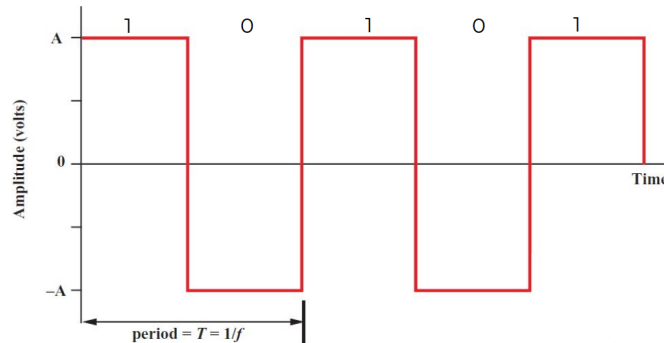
Periodo: Il periodo di $s(t)$ è il periodo della frequenza fondamentale ($T = 1/f$).

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

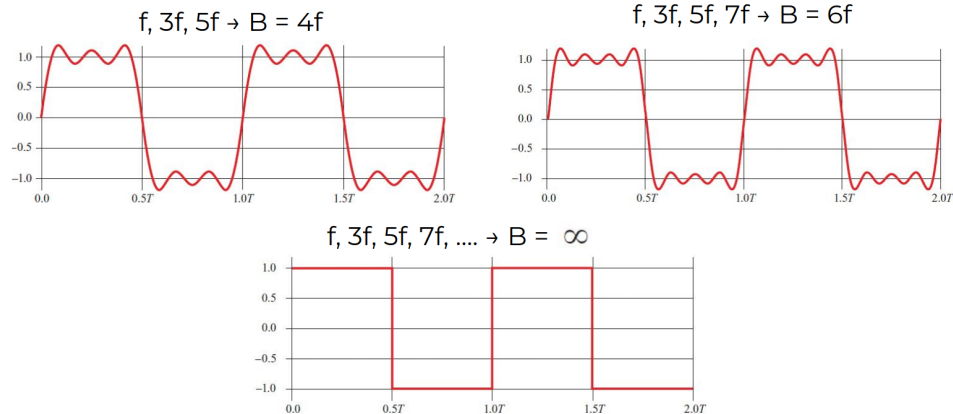
Esempio: vogliamo trasmettere un'onda quadra come **composizione finita di onde sinusoidali**. Esempio:



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 Mhz ($5f - f$)	8 Mhz ($2(5f - f)$)
Data rate (bps)	2 Mbps ($2 \text{ bit}/\mu s$)	4 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

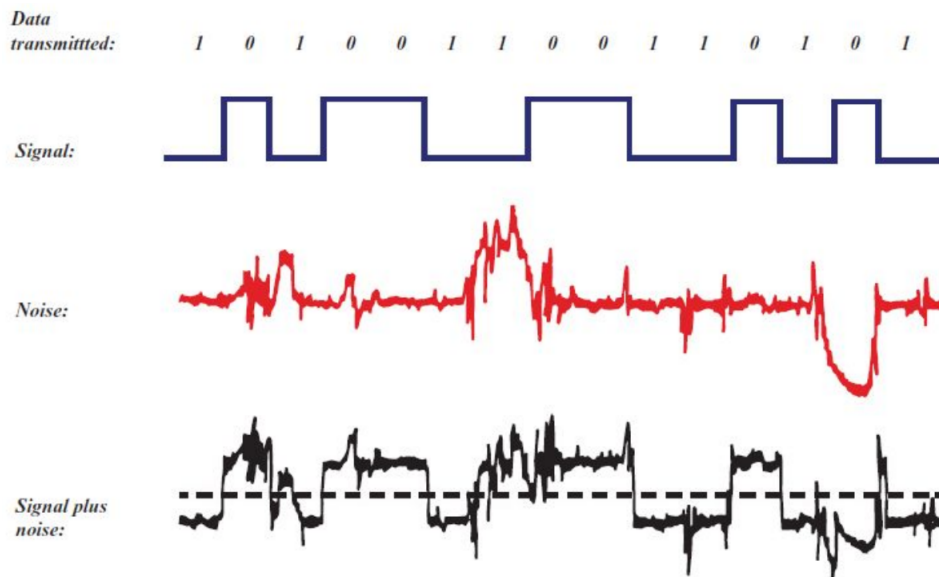
$$C = 2B \log_2 M$$

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 in 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 in 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 describe 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:

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

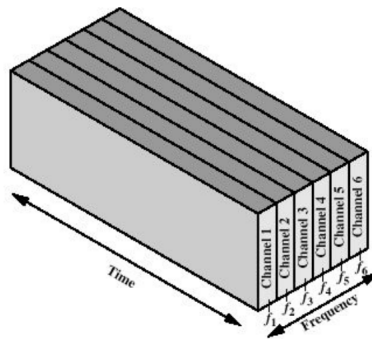
Di più di 16 sarebbe inutile perché trasmettendo un numero maggiore di livelli non possiamo superare la capacità teorica detta da Shannon. La capacità dipende dalla condizione del canale e dal numero di livelli.

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.

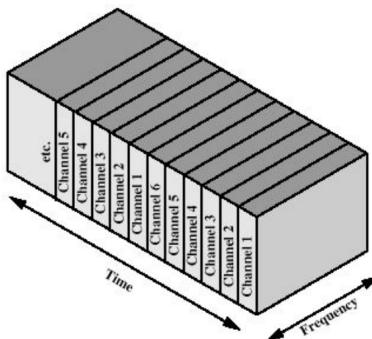
1.3.1 Frequency Division Multiplexing FDM

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.



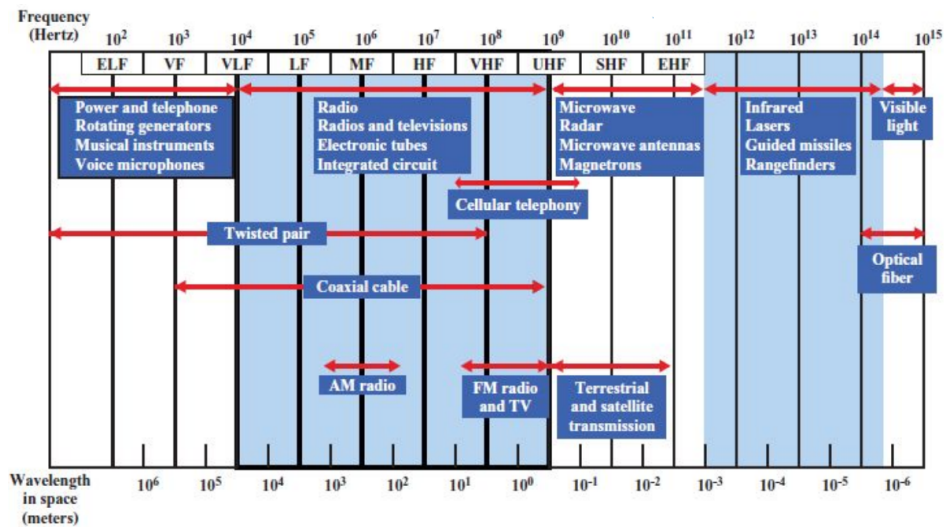
2 Comunicazione Wireless

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:

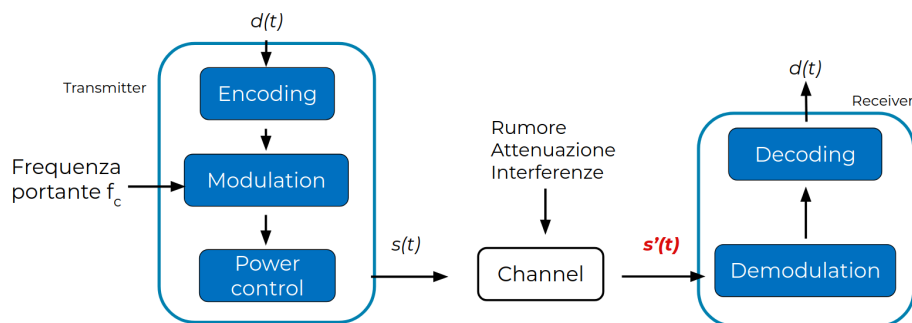
1. Se tutti i dispositivi trasmettessero in banda base, tutte le comunicazioni radio farebbero interferenza l'una con l'altra
2. Più è bassa la frequenza più grande deve essere l'antenna ($\lambda/2$ per antenna dipole, es: $1MHz \sim 142$ metri, $2100MHz \sim 7$ cm)
3. Ogni range di radio frequenze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

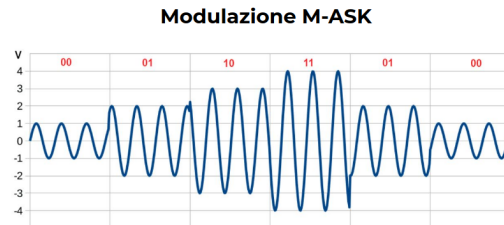
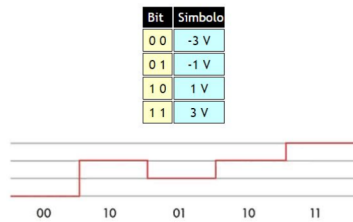
Symbol rate: Quantità di simboli trasmessi al secondo (misurato in baud). Dipende dal processore fisico.

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.

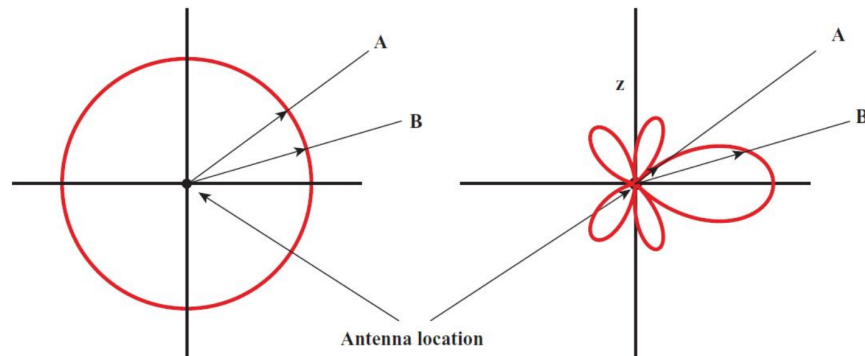
2.2 Trasmissione delle onde radio

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 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 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).