

## Lo STRATO Fisico

Primo Obiettivo: Rappresentazione digitale dell'informazione

Oramai tutte le applicazioni comunicano tra di loro in maniera digitale (Digital Networks).

I problemi, però, legati ai bit sono tanti: il tempo necessario per trasferire il messaggio senza errori, riducendo questo tempo, la banda necessaria.

La STRUTTURA di file come Testi, immagini, dati file... si chiama INFORMAZIONI A BLOCCHI, cioè sono composta da un insieme di unità indipendenti. La dimensione (size) dipende dal numero di bit o byte per blocco. Per quanto riguarda la trasmissione, il flusso (STREAM) di informazioni può essere prodotto ed inviato in modo continuo, come la voce (REAL-TIME voice) o i video (STREAMING VIDEO), oppure seguendo il BITRATE (velocità di trasmissione) che misura la quantità di informazioni digitali (bit) che riuscì ad trasmettere ogni secondo.

Per trasferire un blocco di dati può esserci un certo ritardo  $\rightarrow$  DELAY DI TRASFERIMENTO

Delay minimo =  $t_{prop}$  (tempo di propagazione lungo un mezzo trasmissivo) +  $t_{trasf}$  (tempo di trasferimento) =

$$= \frac{d}{c} (\text{lunghezza del collegamento}) + \frac{L}{R} (\text{n° bit in un messaggio})$$

Si riduce amministrando sender e receiver

- si riduce con le TECNICHE DI COMPRESSEIONE
- R aumenta grazie alle TECNICHE DI TRASMISSIONE

TECNICHE DI COMPRESSEIONE = comprime i dati, può avvenire in due modi:

1. SENZA PERDITA (Lossless): quando l'informazione viene decompressa è esattamente uguale all'originale.  
Esempio: zip, GIF, Fax

2. CON PERDITA (Lossy): l'informazione decompressa non è identica all'originale. Esempio: jpeg

Il Rapporto di decompressione (COMPRESSION RATIO)  $\Rightarrow R_c = \frac{B_{orig}}{B_{comp}}$  ( $n^2$  bits originali) > 1 ( $n^2$  bits compressi)

### ESEMPI DI INFORMAZIONI A BLOCCHI

Tipo	Metodo	Formato	Origine	Rc
Text	Zip	ASCII	Kbyte	$2 \leq R_c \leq 6$

Fax	CCITT	A4 Page	256 pixel/in <sup>2</sup>	5-54 Kbyte
	Group 3	200x100	Kbyte	$(5 \leq R_c \leq 30)$

Immagine JPEG	8x10 in <sup>2</sup>	38.4 Mbyte	1-8 Mbyte	Quindi $B_{orig} = 3 \times (H \times W) \text{ pixel} \times B \text{ bit/pixel}$
A COLORI	photos	400 pixel/in <sup>2</sup>	Mbyte	$(5 \leq R_c \leq 30)$

un'immagine viene divisa in 3 componenti: Rosso, Verde e Blu  
componenti altezza larghezza bit per pixel  
Quantità di pixel

la risoluzione è data dai quanti bit impiegati per rappresentare un pixel e da quanti pixel per centimetro<sup>2</sup> ci sono

Invece la rappresentazione in bit dei file che evolvono nel tempo (STREAM INFORMATION) sono trattati in maniera differente.

### Segnale vocale / audio:

In forma originale è un file di tipo analogico.

Esso deve essere digitalizzato e trasmesso in tempo reale.

E' da osservare che, come il livello del segnale analogico varia nel tempo, anche i bit che lo rappresentano variano.

### Operazioni per la digitalizzazione di segnali analogici (voce ed audio)

1. Ogni volta decido di leggere le pressioni della voce cioè CAMPIONO IL SEGNALE. In inglese l'operazione

di CAMPIONAMENTO viene definito SAMPLING ed i campioni SAMPLES. La distanza tra due campioni

vengono chiamata INTERVALLO DI CAMPIONAMENTO

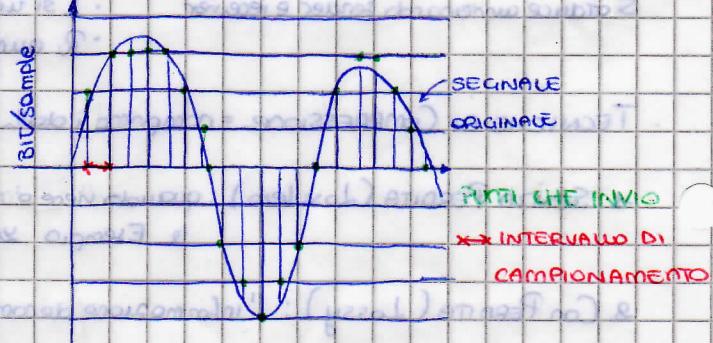
2. Divido l'asse verticale in livelli su cui associo un certo numero di bit.

3. Approssimo i campioni ai livelli più vicini. Si trasmetteranno solo i bit che rappresentano i punti approssimati.

Il n° di bit dipende dal numero di livelli in cui devo dividere l'asse verticale [es. 2 = 8 bit]

$$\text{Bit Rate} = \frac{\text{n° bit}}{\text{campioni}} \times \frac{\text{n° campioni}}{\text{secondi}} = R_s$$

Naturalmente più bit impiego, quindi più sono i livelli, e più sono i campioni che prendo per secondo, più sarò fedele alla traccia originale.



Per stabilire l'ampiezza dell'intervallo di campionamento, introduciamo il Teorema del Campionamento.

Esso dà un limite al questo tempo; il limite dipende dall'occupazione del segnale non nullo nel tempo ma

in frequenza. Infatti quando noi produciamo suoni di diverse frequenze, che potranno essere più

alte o più basse ma non supereranno una certa BANDA DI FREQUENZA o di segnale ( $W_s$ ) espressa in

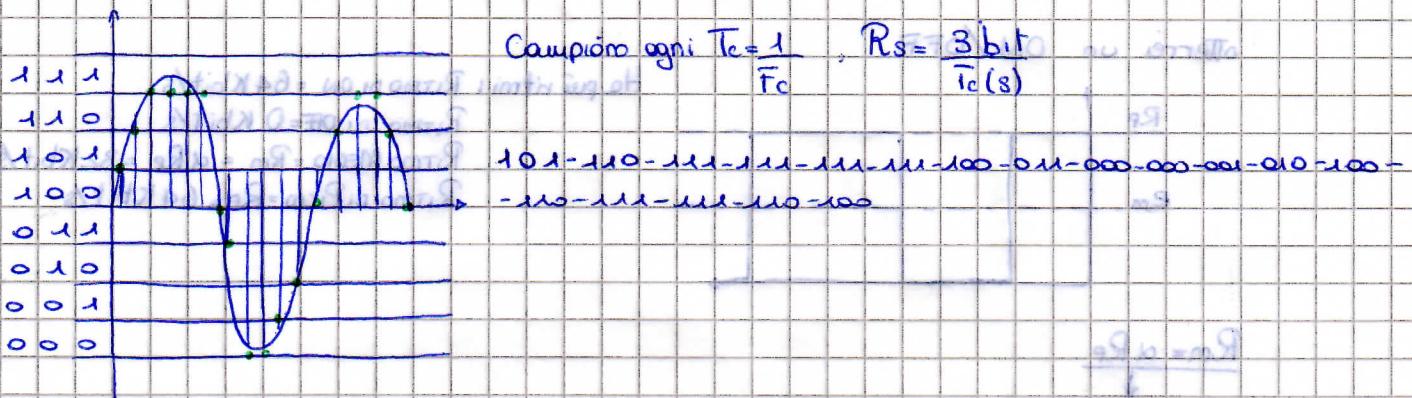
Hertz]. Nell'essere umani la banda di frequenza va da 0 a 4 KHz.

Il teorema afferma che se campiono ogni  $T_c = \frac{1}{F_c}$  dove  $F_c$  = frequenza di campionamento =  $2 \times W_s$

allora riuscirà a riprodurre fedelmente il suono. Se  $F_c < 2 \times W_s$  non produrrà una fedele riproduzione.

Se invece  $F_c > 2 \times W_s$  non ci sarà un sostanziale cambiamento. Per la voce umana  $T_c = \frac{1}{F_c} = \frac{1}{2 \cdot 4 \text{ KHz}} = \frac{1}{8 \text{ KHz}} = \frac{1}{10^{-6}}$

## Esempio di Conversione analogico digitale



Gli oggetti che traducono il segnale da analogico ad digitale sono i codificatori, tendono a comprimere i file così da poter agevolare la trasmissione di dati.

I file vocali ed audio vengono compresi nel esempio risparmiando sulla codifica delle pause (le sottili) oppure, come nella telefonia, il segnale audio viene sintetizzato direttamente al ricevente; cioè chi riceve genera un segnale finto (sintetico) della voce e su questo segnale applica delle caratteristiche tipiche di ciò che sta dicendo la persona e perciò vengono trasmessi solo i bit che servono per formulari questo segnale sintetico in reale.

## Segnale Video:

Vengono trasmesse una sequenza di immagini (PICTURE FRAME), ciascuna delle quali viene digitalizzata e compressa. La FREQUENZA di ripetizione delle frame varia da 10 a 60 Frame/sec. Il fatto di trasmettere immagini ogni  $T_c$  secondi sfrutta il fatto che la foto rimane impressa sulla nostra retina per alcuni istanti.

$$\text{RATE} = \underbrace{M \frac{\text{bits}}{\text{pixel}}}_{\text{immagine fisica}} \times \underbrace{(W \times H)}_{\text{frame}} \times \underbrace{F}_{\text{second}} = \text{Ritmo Binario} \rightarrow \text{varia a seconda dell'ampiezza dell'immagine}$$

(Più è grande più è ampio il bit rate)

E' importante, anche per il video, comprimere, uno dei modi è codificare una sola volta un frame che si ripete spesso e modificare solo i dettagli che si muovono (si codifichino solo i monimenti).

Oss. Ci stiamo occupando ancora della codifica di origine cioè delle conversioni che avviene da chi invia.

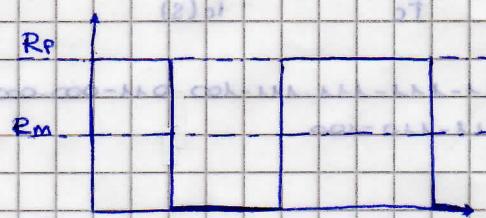
Dopo aver digitalizzato l'informazione stream, posso avere due tipologie diverse di Bit-Rate nel tempo.

• Constant Bit RATE: emetto la stessa quantità di bit ogni secondo (esempio Rete Telefonica a 64Kbit/s)



Se inseriamo in questo segnale le pause, cioè decidiamo che quando c'è una pausa lo non trasmetto

otterrei un ON/OFF



Ha più ritmi: Ritmo di ON = 64 Kbit/s

Ritmo di OFF = 0 Kbit/s

Ritmo Medio =  $R_m = \alpha R_p = 32 \text{ Kbit/s}$

Ritmo di Picco =  $R_p = 64 \text{ Kbit/s}$

$$R_m = \alpha R_p$$

In generale:

$\alpha = \text{coeff. di attacco} \leq 1 \rightarrow \alpha = 1$  quando l'utente è attivo infatti  $\alpha = R_m$ .

Rp

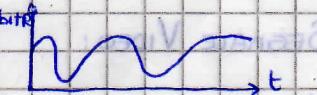
Nel caso on/off con  $\alpha = 1$   $T_{ATTIVITA} = T_{ON}$ ,  $G = \text{grado di intermittenza} = 1$

$$\frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}}$$

E' importante conoscere  $\alpha$  per distribuire bene le risorse così da abbassare i costi, essa è chiamata MULTIPLAZIONE STATISTICA, cioè mette insieme più utenti e sfrutta la dinamicità della loro comunicazione.

Per esempio se  $\alpha = 0,2$  cioè sfrutta il 20% delle risorse, il restante viene fornito ad un altro). Questa moltiplicazione è usata per il funzionamento di internet.

**VARIABLE BIT RATE:** i flussi informativi sono continui ma variabili nel tempo. In questi casi la rete dovrà saperizzare efficientemente la variabilità del bit rate.



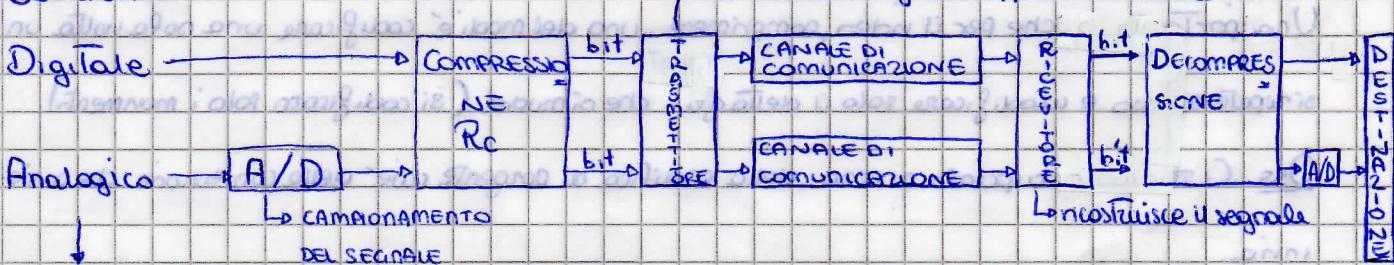
Alcuni problemi introdotti dal traffico in rete (NETWORK IMPAIRMENTS) sono:

- Ritardo (Delay)
- Variabilità del Ritardo (Jitter)
- Perdita di informazioni (Loss)

Questi problemi sono gestiti dai protocolli di trasferimento.

## Secondo Obiettivo: TRASMISSIONE NUMERICA

SORGENTE



Le sorgenti possono essere anche di natura statica (immagine) o dinamica (video).

Per il trasporto di bit dovrà trovare un SEGNALE che passerà attraverso il canale di comunicazione.

Il trasferimento potrà avere delle alterazioni. Queste alterazioni sono:

- ATTENUAZIONE DEL SEGNALE → si attenua l'ampiezza del segnale

## • DISTORSIONE DEL SEGNALE

### • RUMORE ADDITIVO

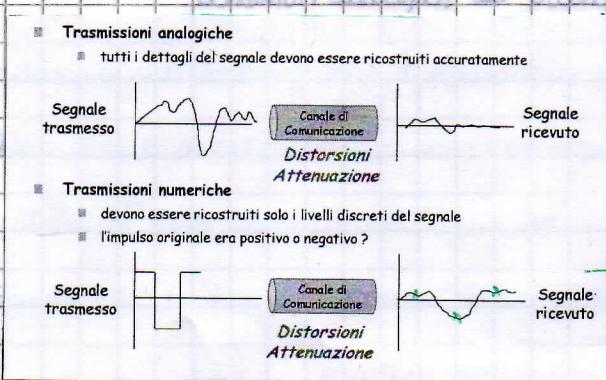
#### • INTERFERENZA CON ALTRI SEGNALI

Il vantaggio del digitale è che non deve ricostruire tutti i dettagli del segnale ricevuto come nelle trasmissioni analogiche, ma deve solo capire, in alcuni istanti, se è positivo o negativo.

E' infatti più semplice ricostruire un segnale che trasporta solo zeri ed uni.

L'operazione di ricezione, cioè la ricostruzione del segnale, avviene in istanti ben specifici ed a soglia ( $> 0 \rightarrow 1, < 0 \rightarrow 0$ ). Possono generarsi sempre degli errori, ad esempio se vi è troppa attenuazione del segnale, però sono meno probabili e più semplici da gestire.

### Esempio:



Per trasmettere in maniera analogica a lunga distanza si deve fronteggiare il problema che tanto e più lungo il collegamento, tanto è più attenuato il segnale. Al fine di questo problema sono stati introdotti i **RIPETITORI**, i quali devono ampliare la curva del segnale e renderla il più possibile simile a quella ricevuta in ingresso. Si capisce, però, che questa non è una rigenerazione ideale, infatti non tutte le alterazioni vengono eliminate ed in più la qualità del segnale diminuisce con il crescere del n° di ripetitori.

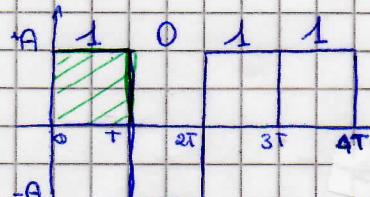
Anche nelle trasmissioni numeriche (Digitali) a lunga distanza vengono inseriti dei rigeneratori, che con facilità e tramite la decisione a scatti ricostruiscono il segnale originale in maniera praticamente identica e con bassa probabilità di errore.

Quindi i vantaggi delle trasmissioni numeriche sono molti: - Le comunicazioni possono avvenire a lunghe distanze

- Funzioni più semplici: codifica, rigenerazione, compressione ...

- Costi ridotti,

Le trasmissioni numeriche possono essere codificate in questo modo:



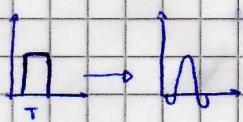
Dove nelle ordinate troviamo le ampiezze (ad esempio espresse in Volt se parliamo delle tensioni elettrico magnetiche su un canale).

$$\Rightarrow \text{Bit Rate} = \frac{1}{T} \text{ bit/sec}$$

(Invio ad esempio una tensione a positivo  $\rightarrow 1$  o negativo  $\rightarrow 0$  ogni  $T$ )

Come posso aumentare il Bit Rate?

Diminuendo il tempo  $\rightarrow$  ogni  $T$  invio 2 bit  $\Rightarrow$  PROBLEMA: Se il canale fosse IDEALE il segnale non subirebbe alterazioni e quindi  $T$  potrebbe tendere ad  $\infty$ . Purtroppo però, nella realtà, il canale porta av delle alterazioni sul segnale. Infatti ogni simbolo ("pezzo" di curva che identifica un solo bit), cioè ogni impulso, dureta allargato ed arretrudato.



Ciò comporta ad avere degli errori quando il regeneratore attua la decisione su soglia per ricevere la sequenza numerica.

Gli errori possono essere: **INTERFERENZA INTERSIMBOICA**: le code finali di due simboli possono interficire e sommarsi creando una nuova curva diversa dall'originale.

- L'intervallo di decisione, cioè l'istante in cui viene valutato il segnale, può non coincidere perfettamente al centro di  $T$  e perciò l'arretramento del simbolo alto fa probabilità di errore.

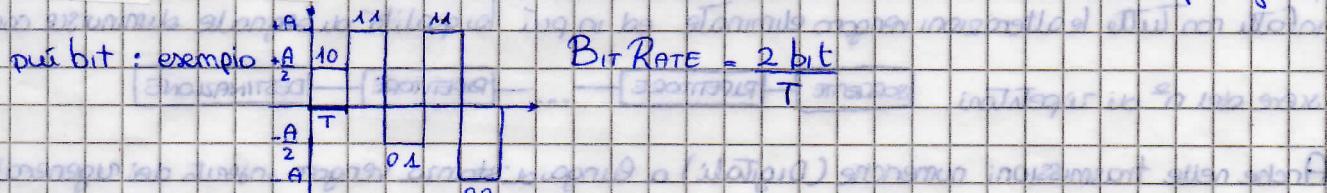


$\rightarrow$  Un teorema calcola la Frequenza massima di impulsi inviati in modo che non ci siano interferenze intersimboliche: questa frequenza  $F$  dipende dalla BANDA DEL CANALE ( $W_c \rightarrow$  BandWidth)

$$F = 2 \times W_c \rightarrow \text{Frequenza di Nyquist}$$

$\hookrightarrow$  Parametro che rappresenta quante frequenze il canale comprende.

**Codifica Multilivello**  $\rightarrow$  Divido in più livelli l'asse verticale e decido di inviare per ogni impulso



Il numero di livelli è  $M = 2^m$  dove  $m$  sono il numero di bit che invio ad impulso.

$$\Rightarrow \text{Bit Rate} = m \frac{\text{bit}}{\text{impulso}} = \frac{2 W_c}{\text{sec}}$$

$\hookrightarrow$  Bit Rate senza interferenze intersimbolica (Baud Rate)

$\Rightarrow$  PROBLEMA: Aumentando i livelli, diminuisce la loro distanza  $\rightarrow$  ciò crea dei problemi

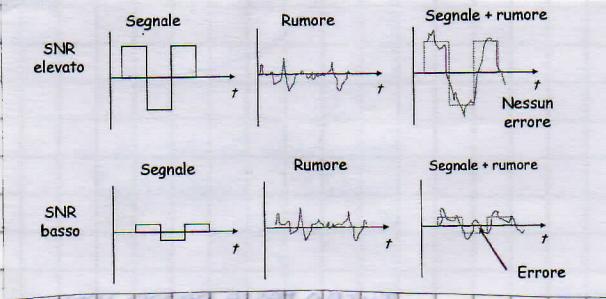
durante la decodifica a soglia soprattutto quando al nostro segnale si sovrappono del rumore.

RIS. ADDITIVO. Questo è dovuto dall'interferenza con altre comunicazioni esterne, ma anche da altri

fattori. Per rendere la comunicazione migliore possibile, bisogna introdurre un nuovo parametro

$\text{SNR} = \text{Signal - to - Noise - Ratio} = \frac{\text{Rapporto tra segnale e rumore}}{\text{Potenza media del segnale}} = \frac{\text{Potenza media del segnale}}{\text{Potenza media del rumore}}$

Più alto è meglio per la comunicazione. Se calcolo il rapporto in decibell  $\text{SNR(dB)} = 10 \log_{10} \frac{\text{SNR}}{\text{SNR minima}}$



Da tutto ciò ne dediamo che non posso aumentare i livelli M all'infinito. Se il canale non è ideale,

avrò sempre una possibilità di errore da parte del decisore: il Bit Error Rate =  $\frac{\text{Bit Corretti}}{\text{Bit Totali}}$

La massima capacità di un canale è data dal Limite di Shannon:

$$C = W_c \log_2 (1 + \text{SNR}) \frac{\text{bit}}{\text{s}}$$

Quindi se il mio Bit Rate  $R < C$  allora avrò un Bit Error Rate basso, viceversa se  $R > C$ , il mio Bit Error Rate è alto.

### LA BANDA DEL CANALE

$W_c$  è quell'insieme di frequenze che passa inalterato quando trasmetto un segnale su quel canale.

Per CANALE DI COMUNICAZIONE si intende l'insieme dei mezzi trasmissivi e dei dispositivi, in cui passa il segnale che parte dalla sorgente ed arriva al destinatario.

Si usa il termine FILTRO per indicare gli effetti del canale sul segnale.

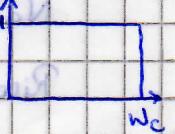
Il filtro passa basso IDEALE (costante) fa passare, senza alterarla, tutte le frequenze che vanno da 0 ( $\rightarrow$  passa basso) a  $W_c$ , se  $f > W_c$  sono bloccate.

La larghezza di banda è l'ampiezza di tutte le frequenze che passano attraverso l'intervalle  $0 - W_c$ .

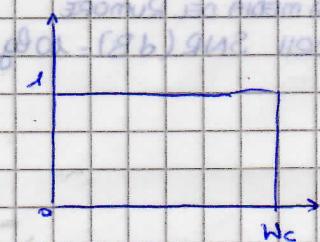
Alcuni canali si comportano come un filtro passa-basso che blocca le basse ed alte frequenze.

E' da notare che avere un comportamento del segnale costante, quindi facciamo riferimento ad un filtro passa basso ideale, cioè una RISPOSTA IN AMPIEZZA del tipo

è tanto più difficile quanto più grande è la banda.

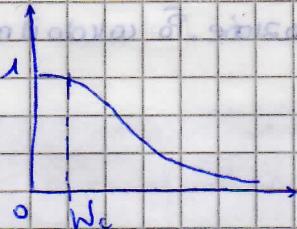


Esistono dei canali che hanno un comportamento SELETTO IN FREQUENZA, cioè non costante. Si vorrà però sempre di avere un andamento costante.



RISPOSTA IN AMPIEZZA  
(OPPURE IN FREQUENZA)  
Costante

FILTRO PASSA BASSO IDEALE



RISPOSTA IN AMPIEZZA  
(OPPURE IN FREQUENZA)  
Non costante

Come bandas considero quella parte in cui vedo il segnale costante

FILTRO PASSA BASSO IDEALE

Come scritto prima molti canali si comportano come un filtro passa banda ma questa volta la larghezza di banda non parte da 0 bensì  $W_c$  è intuibile ad una FREQUENZA PORTANTE  $f_c$ . Usato per la Frequency Division Multiplexing.



Consideriamo il caso in cui abbiamo due canali incerchiati in due frequenze molto diverse tra loro ma con stessa banda. Trasmettono in egual modo? Sí, perché unica sola  $W_c$ ,  $f_c$  è solo il punto in cui si trova la mia banda.

Tutti i segnali hanno una rappresentazione in frequenza che si chiama RAPPRESENTAZIONE DI FOURIER. Essa sarebbe la raffigurazione di un segnale, il quale può essere considerato come una composizione di sinusoidi.

Cioè che trasmetto, grazie alla serie di Fourier, può essere visto come la somma di sinusoidi (componenti in frequenza). Una di queste fa riferimento alla frequenza portante.

La curva sinusoidale principale è la rappresentazione in frequenza delle mie onde quadre ed a cui aggiungo altre componenti che hanno frequenze multiple alla sua. Queste ultime hanno i coefficienti che diminuiscono quindi l'ampiezza delle curve scemando sempre più.

Se però, il mio canale taglia un certo numero di frequenze, che includono anche alcune necessarie, la forma dell'onda cambia; oppure in modo selettivo altre alcune frequenze e quindi cambia alcune componenti, il segnale varia.

Naturalmente più è ampia la banda, minore sarà la distorsione del canale sul segnale.

Ricapitolando:

1. Rappresentazione del segnale: se esso è periodico  $\rightarrow$  SERIE DI FOURIER } RAPPRESENTAZIONE DI FOURIER  
se esso è costante  $\rightarrow$  TRASFORMATA DI FOURIER }

2. BANDA DI CANALE ( $W_c$ ): insieme di frequenze che passano inalterate in quel canale

3. BANDA DEL SEGNALE ( $W_s$ ): insieme delle componenti con ampiezze più alte (le altre INFINITE sono trascurabili perché non condizionano la rappresentazione)

La potenza del segnale è la somma delle ampiezze, modulo al quadrato.

Lo spettro in frequenza del segnale è il set delle ampiezze delle componenti infinite della rappresentazione di Fourier.

La banda del segnale è un sottoinsieme dello spettro, in cui vengono escluse quelle frequenze di cui le ampiezze corrispondenti non alterano significativamente la curva che trasmetto.

### IMPIULSI AD INTERFERENZA INTERSIMBOICA NULLA

Gli impulsi sono le curve dipendenti da  $t$  ( $f(t)$ ) su cui trasporto 1 bit da innanze.

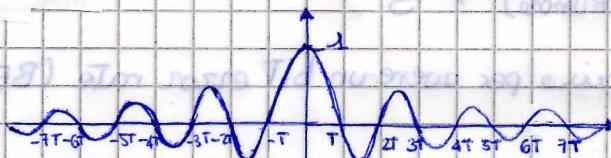
Quando invio un impulso esso potrebbe deformarsi ma soprattutto potrebbe confondersi con le code di quelli successivi e precedenti così da creare un'interferenza intersimbolica.

Un modo per rendere questo fenomeno nullo è spedire un segnale modulato del tipo  $\sin x$  chiamato anche Sync.

Un segnale modulato è una curva la cui forma dipende dai bit che voglio trasportare (Modulazione). Ci sono varie modulazioni, una di queste è per AMPIEZZA, in inglese PAM (Pulse Amplitude Modulation), in cui l'ampiezza, appunto, dipende dall'impulso.

Sarà positiva se trasporto un 1, negativa se trasporto uno 0.

Come scritto prima una curva  $f(t) = \sin x$  è un impulso ad interferenza intersimbolica nulla.



Se innassi più impulsi di questo tipo, le code interferirebbero in corrispondenza degli zeri.

Quindi per avere un segnale con questa interferenza nulla, esso deve essere parziale (zero negli istanti più significativi).

Il bit Rate max è  $2W_c$  dove  $W_c$  è la banda del canale, che nel caso considerato è passa-basso ideale.

Date le bande se i miei impulsi sono del tipo  $f(t) = \frac{\sin(2\pi W_c t)}{2\pi W_c t}$ , allora non c'è interferenza intersimbolica.

E' da sottolineare che non si è comunque esenti da errore. Infatti chi legge deve essere sincronizzato perfettamente con chi si parla, infatti se la lettura non avviene all'interno di intervalli significativi, potrebbe esserci ambiguità.

I discorsi su i segnali ad interferenza intersimbolica (chiamata anche ISI) possono essere fatti anche se aumenta i bit che trasporta ogni impulso.

La trasmissione multi livello serve per aumentare la capacità del mio bit rate, infatti se i livelli sono  $M = 2^m$  ( $m$  n° bit trasportati) allora

$$\text{Bit Rate} = R = \frac{2W_c}{s} \frac{\text{Impulsi}}{\text{impulso}} \times \frac{m \text{ bit}}{s} = 2W_c m \text{ bit/s}$$

Purtroppo  $M$  non può tendere all'infinito a causa del rumore additivo.

Infatti il rumore potrebbe rendere ambiguo discriminare i livelli.

E' interessante calcolarsi il rapporto segnale-rumore ma soprattutto capire con quale probabilità si rischia di fraintendere il livello.

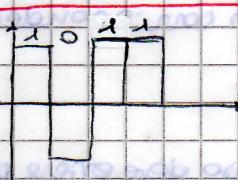
Sotto determinate ipotesi (NON IN PROGRAMMA), la probabilità che fraintenda il livello dipende dalla potenza (altezza) del segnale. Tanto più alto è il rapporto segnale-rumore, tanto più la probabilità decresce.

Se è presente il rumore, la capacità massima chiamata LIMITE DI SHANNON è

$$C = W \log_2 \left( 1 + \frac{\text{Segnale}}{\text{Noise(Rumore)}} \right) \frac{\text{bit}}{s} \quad \text{dove } W \text{ è la banda del canale.}$$

Questo è il bit rate massimo per avere un bit error rate (BER) arbitrariamente piccolo.

CANALE Passa-Basso → CANALE Passa-Banda



(in realtà gli impulsi non sono quadrati ma del tipo senx)

Il segnale dell'esempio è trasmesso su un canale passa-basso ideale (cose costanti).

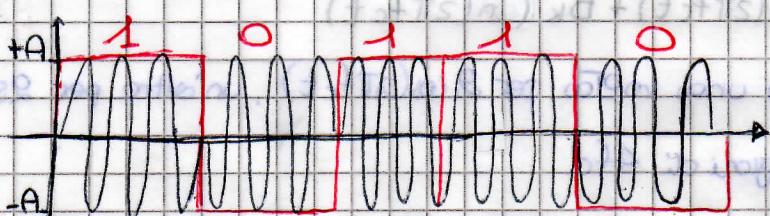
da domanda che mi pongo è come posso trasfarlo in modo che sia centrato nella frequenza portante della nuova banda di canale (perciò il canale si definisce passa banda ideale).

Il metodo usato è di moltiplicare il segnale per  $\cos(2\pi f_c t)$ .

Questa operazione è chiamata modulazione di fase (PSK → PHASE SHIFT KEYING)

In poche parole se invio 1 avrò dunque  $A \cos(2\pi f_c t)$ , se invio 0 viene mappato come  $-A \cos(2\pi f_c t)$

L'esempio di prima modulato durente:



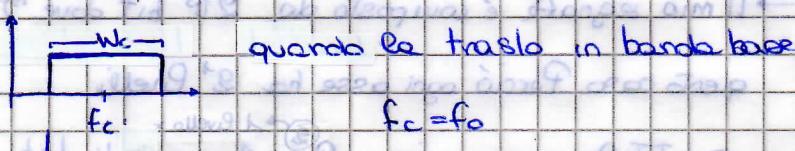
Se ora voglio DEMODULARE per poi applicare il decisore al segnale, ti moltiplico per  $2 \cos(2\pi f_c t)$

Si può dimostrare matematicamente infatti:

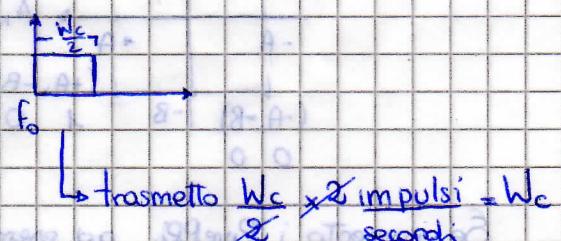
$$A_k \cos(2\pi f_c t) \cdot 2 \cos(2\pi f_c t) = 2 A_k \cos^2(2\pi f_c t) = \underline{A_k} [1 + \cos(2\pi 2f_c t)] = \\ = \underline{A_k} [1 + \cos(2\pi 2f_c t)] = \underline{\underline{A_k + A_k \cos(2\pi 2f_c t)}} \quad \xrightarrow{\text{SEGNALE ORIGINALE IN BANDA BASE}}$$

Per escludere  $A_k \cos(2\pi 2f_c t)$ , così da avere solo il mio segnale, filtro ciò che ho ottenuto tutto dalla moltiplicazione con un filtro PASSA-BASSO che esclude le frequenze superiori a  $2f_c$ .

E' da notare però che io non sfrutto al massimo la banda traslata infatti



trasmetto  $W_c \times 2$  impulsi secondo



Perciò perdo metà della banda disponibile

Per ovviare a questo problema utilizzo la modulazione numerica di AMPIZZA IN QUADRATURA (QAM → QUADRATURE Amplitude Modulation). Usa una trasmissione su due dimensioni.

Dinido il mio segnale composto da bit in due:  $A_k$  e  $B_k$ .

Ak viene moltiplicato per  $\cos(2\pi fct)$ , Bk invece, per  $\sin(2\pi fct)$ . Poi trasmetto le due somme, perciò li trasmetto contemporaneamente.

Penso fare ciò poiché sen e coseno sono due onde ortogonali ed in quadratura.

Quindi  $A_k \cos(2\pi fct)$  invia  $W_c$  impulsi come  $B_k \sin(2\pi fct)$ , perciò inviando le loro somme.

Invia trasmetto  $2W_c$  impulsi in  $T$  secondi.

Se il mio segnale è  $110110 \rightarrow A_k = 101 \xrightarrow{\text{moltiplico}} A_k \cos(2\pi fct)$   
 $B_k = 110 \xrightarrow{\text{moltiplico}} B_k \cos(2\pi fct)$

Così che trasmetto è  $y(t) = A_k \cos(2\pi fct) + B_k \sin(2\pi fct)$

Per la demodulazione moltiplico una volta per  $2 \cos(2\pi fct)$ , un'altra per  $2 \sin(2\pi fct)$ .

Poi toglio fuori le frequenze maggiori di  $4fc$ .

Ricapitolando

$$2 \cos(2\pi fct) \Rightarrow A_k + A_k \cos(4\pi fct) + B_k \sin(4\pi fct)$$

$$y(t) = A_k \cos(2\pi fct) + B_k \sin(2\pi fct)$$

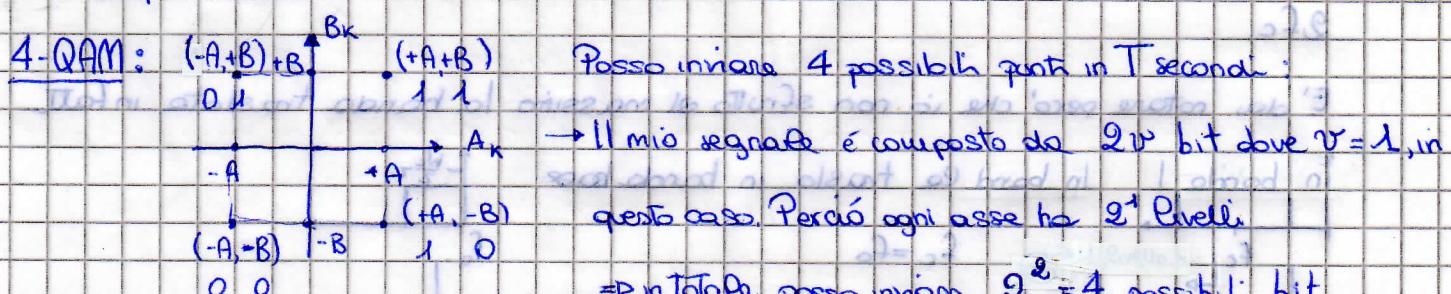
$$2 \sin(2\pi fct) = B_k + B_k \cos(4\pi fct) + A_k \sin(4\pi fct)$$

Grazie a questo QAM posso rappresentare i miei segnali in:

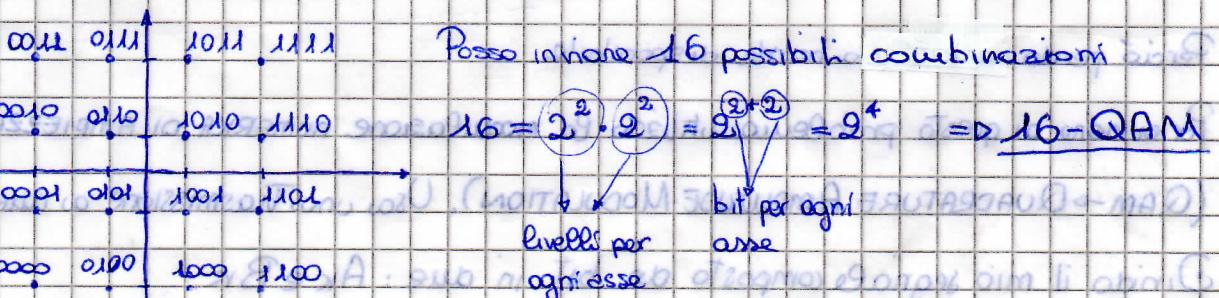
Costellazioni:

Con il QAM invio due impulsi contemporaneamente. Una è la componente in fase (cos), l'altra in quadratura (sen). Trasferisco due bit che però non si trovano sulla

stessa asse ma sono punti del piano che ha come asse x la fase e come asse y la quadratura.



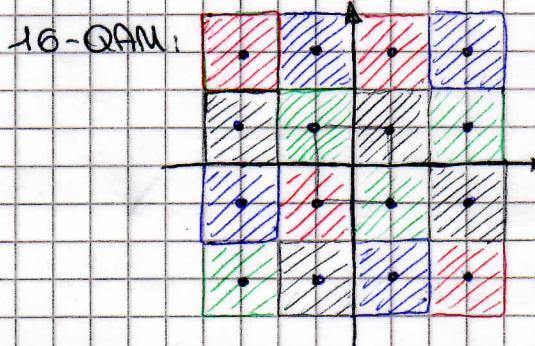
Se aumento i livelli ad esempio su ogni asse ho  $2^2$  livelli.



La modulazione QAM non puo' essere fatta in Bande-Basse.

Il numero di livelli che posso creare per ogni amo non è infinito ma limitato dal rumore additivo (come succederà in bande-base). Posso sbagliare su una dimensione o sull'altra e quindi confondere i punti delle costellazione. E' lo stesso avverso fatto per una sola dimensione. I decisioni ai soglie individuano nel piano una regione per ogni punto così da non commettere errore, se adesso si somma rumore e quindi si sposta.

Si avrà una decisione errata se il punto esce da questa "zona decisionale".



Se i punti escono dalle loro zone colorate allora il decisore commetterà errore.

Dai si capisce che all'aumentare dei livelli, il rumore pesa molto di più al passo di potenza del segnale.

Esistono altri tipi di costellazioni, ad esempio lo SIGNAL SET a 8 punti. Essa è anche chiamata 8-PSK, sono 8 punti disposti su una circonferenza. Le loro posizioni sono in coordinate polari  $(r, \varphi)$  e sono differenziate in base alla fase  $\varphi$  ( $r=1 = \text{const}$ )

