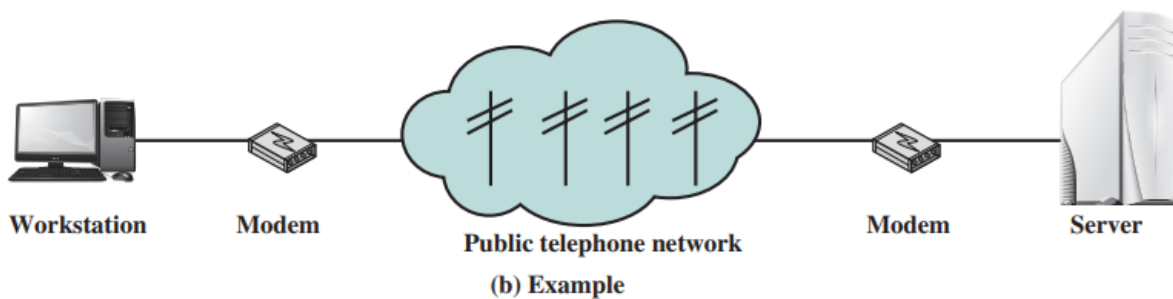
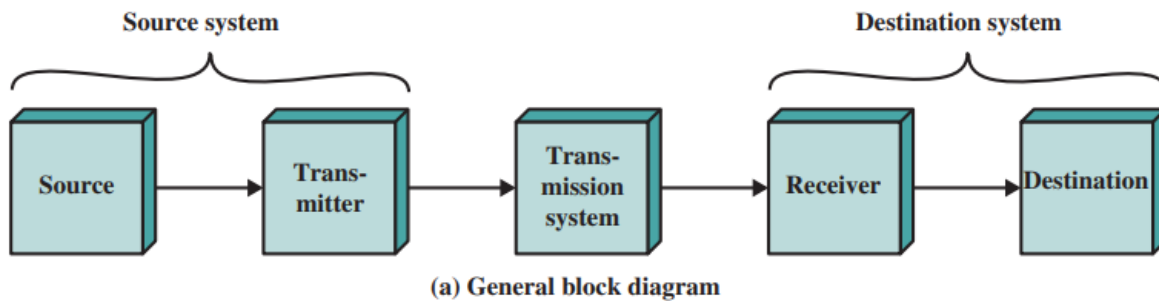


L'obiettivo principale del sistema di comunicazione è lo scambio di dati tra due parti.



FONTE → TRASMETTITORE → RICEVITORE → DESTINAZIONE

La fonte genera le informazioni che devono essere trasmesse, ad esempio i telefoni e i pc.

Il trasmettitore converte le informazioni in segnali che si propagano sotto forma di onde elettromagnetiche che vengono trasmesse sotto forma di qualche sorta di sistemi di trasmissione. Come ad esempio fili di rame, fibra ottica ecc.

Il ricevitore accetta il segnale e lo trasmette in bit che verrà poi letto dalla destinazione.

Questo semplice schema ha in realtà una serie di passaggi complicati.

Ad esempio, la transmission system utilization → si riferisce al bisogno di fare un efficiente uso di trasmissione che semplifica la condivisione di informazione tra un insieme numeroso di devices di comunicazione. Varie tecniche, come la multiplazione (multiplexing), sono usati per permettere a più utenti di accedere alle reti di trasmissione.

Per comunicare serve un'interfaccia di comunicazione con il sistema di trasmissione e successivamente serve il segnale di generazione. Ci deve essere inoltre una sorta di sincronizzazione tra il trasmettitore e il ricevitore. Il ricevitore deve essere in grado di determinare quando un segnale inizia ad arrivare e quando finisce. Deve inoltre sapere la durata di ogni elemento di segnale.

Dietro l'importanza base di decidere la natura e il tempo del segnale, c'è una varietà di caratteristiche che servono per la comunicazione tra due parti che può essere collezionata sotto il termine exchange management. Se i dati devono essere scambiati in entrambe le direzioni su un periodo di tempo, le due parti devono cooperare.

Sempre legati all'exchange management ma che sono importanti da considerarli separatamente sono: il rilevamento di errori e correzione. Il controllo di flusso è richiesto per assicurare che la fonte non sopraffaccia la destinazione mandando dati più velocemente di quanto loro possano essere processati e assorbiti.

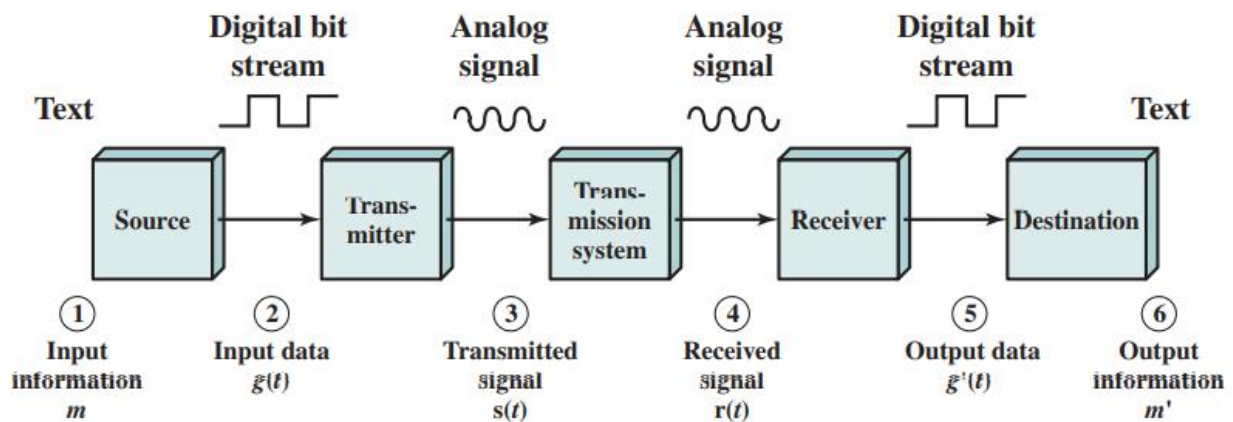
Routing → instradamento delle informazioni

Addressing → indirizzamento

Il percorso che devono fare le informazioni per arrivare a destinazione deve essere ben definito.

Recovery → quando le informazioni cambiano per un mal funzionamento momentaneo del sistema.

Sicurezza → necessaria per le informazioni che si trasmettono.



Immaginiamo che l'input device e il trasmettitore siano componenti di un pc. L'utente del pc vorrebbe mandare un messaggio m ad un altro utente. L'utente apre l'app dell'e-mail nel pc e scrive il messaggio tramite la tastiera (che è l'input device). Le stringhe dell'e-mail sono per un breve periodo salvate (buffered) in una memoria principale. In questa noi possiamo vederle come una sequenza di bit. Il pc è connesso a qualche mezzo di trasmissione, come una local area network, o una connessione wireless, o DSL modem. L'input data sono trasferite al trasmettitore sotto forma di spostamento di tensione ($g(t)$) che rappresentano bit (se la tensione è alta = 1, bassa = 0). Il trasmettitore converte the incoming stream $[g(t)]$ in un segnale $[s(t)]$ adatto alla trasmissione.

Il segnale che viene ricevuto $[r(t)]$ potrebbe essere differente dal $[s(t)]$. Il ricevitore cercherà di risalire al segnale di origine da quello distorto, spedendo alla destinazione un output data, ossia una sequenza di bit, $g'(t)$. Questi bit vengono mandati al pc di output (destinazione), dove sono temporaneamente salvati (buffered) in una memoria come un blocco di bits. In molti casi, il destination system farà attenzione a capire se ci sono stati degli errori durante il processo e in tal caso coopera con la source system per eliminare un blocco di errori di data. Dopo questi processi all'utente del pc di destinazione arriverà il messaggio che dovrebbe essere l'esatta copia di quella iniziale.

Mezzi di trasmissione

Il motivo per cui internet ha avuto sempre più successo è stata la capacità di connettere molti utenti a basso costo. Le tecniche che incrementano l'efficienza con il migliore approccio sono la multiploazione (multiplexing) e la compressione (compression).

Multiplexing → si riferisce all'abilità di un numero di devices di condividere una trasmissione facilmente.

Compression → comprime i data in modo tale da poter usare una minore capacità così che possono essere trasportati più facilmente ad un costo minore.

I trasmission media più usati sono : fibra ottica, coaxial cable, terrestrial and satellite microwave.

Sono necessarie delle tecniche di comunicazione e un'efficienza tale che le informazioni che vengono mandate rimangano il più possibili integre.

3 DATA TRANSMISSION

Il successo della trasmissione dei data dipende principalmente da due fattori: la qualità del segnale che deve essere trasmesso e le caratteristiche del mezzo di trasmissione.

3.1 CONCEPTS AND TERMINOLOGY

Transmission Terminology

La trasmissione dei dati avviene tra trasmettitore e ricevitore attraverso un mezzo di trasmissione. Il mezzo di trasmissione potrebbe essere classificato come guidato o non guidato. In entrambi i casi, la comunicazione è nella forma di onde elettromagnetiche.

Con il **mezzo guidato** le onde sono guidate lungo un sentiero fisico; ad esempio, attraverso fibre ottiche.

Con il **mezzo non guidato**, come il wireless, si fornisce un mezzo di trasmissione per le onde elettromagnetiche ma non fisico: ad esempio la propagazione attraverso l'aria o l'oceano.

Direct link → è usato per riferirsi ad un sentiero di trasmissione tra due devices il cui segnale si propaga direttamente dal trasmettitore al ricevitore senza devices intermedi, al massimo solo amplificatori o ripetitori usati per incrementare la forza del segnale. Questo termine può essere applicato sia ai mezzi guidati che a quelli non guidati

Un mezzo di trasmissione guidato è **point to point** (punto a punto) se è provvisto di un link diretto tra due devices e questi sono i soli due devices a condividere il mezzo.

In una configurazione guidata **multipoint**, più di due dispositivi condividono lo stesso mezzo.

Frequenza, spettro e larghezza di banda (bandwidth)

Abbiamo detto che i segnali elettromagnetiche sono un modo per trasmettere le informazioni (data). Un segnale è generato da un trasmettitore e trasmesso attraverso un mezzo. Il segnale è una funzione del tempo, ma può essere espresso anche come una funzione ^{della frequenza} del tempo. Salta fuori che il **dominio rispetto la frequenza** di un segnale è più importante per capire la trasmissione delle informazioni rispetto a un **dominio rispetto il tempo**.

Il concetto di dominio

Visto come una funzione del tempo, un segnale elettromagnetico può essere analogico o digitale.

In un **segnale analogico** l'intensità del segnale *varia in modo uniforme*, o continuo, nel tempo. In altre parole, non ci sono interruzioni o discontinuità del segnale. (Esempio: voce)

In un **segnale digitale** l'intensità del segnale rimane ad uno stesso livello per un periodo di tempo e poi brutalmente passa ad un altro livello, in un *tempo discreto*. (Esempio: segnale binario)

Il più semplice tipo di **segnale** è quello **periodico** in cui lo stesso modello di segnale si ripete periodicamente nel tempo.

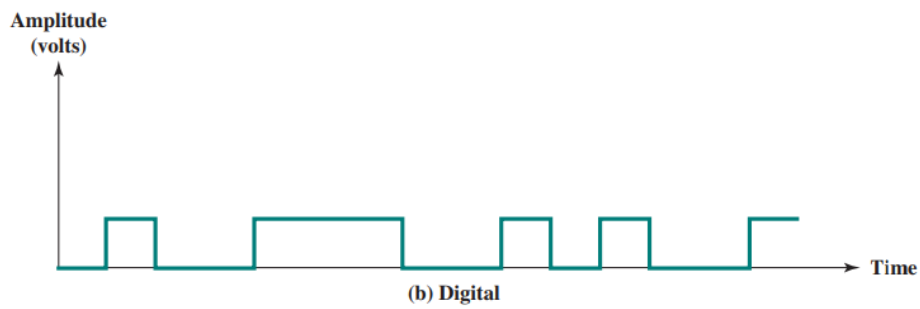
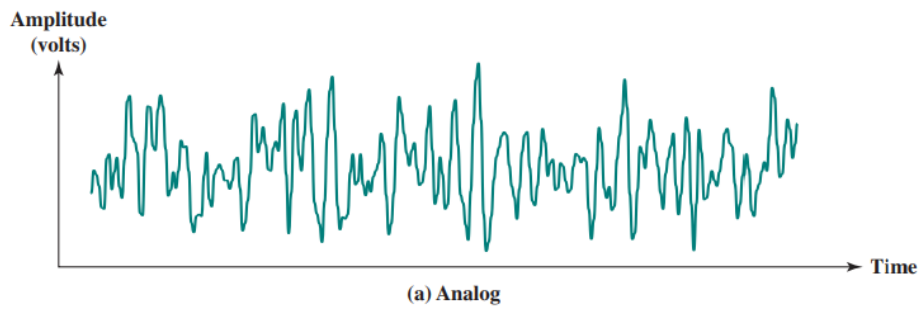
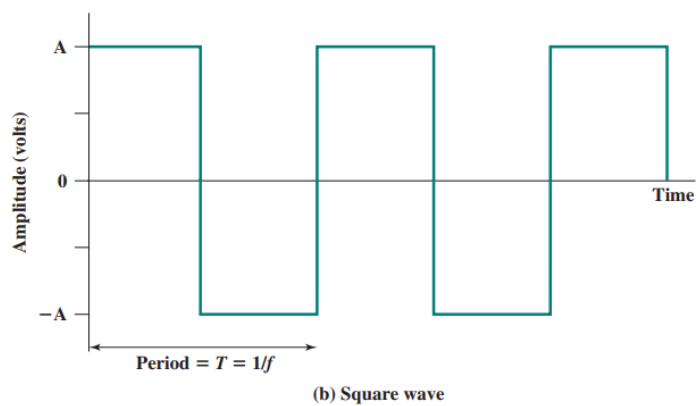
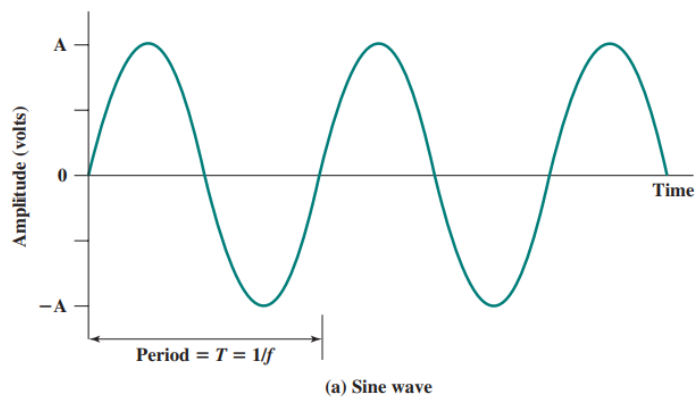


Figure 3.1 Analog and Digital Waveforms



L'ampiezza di picco è il massimo valore o forza del segnale nel tempo; tipicamente è misurato in Volt.

La **frequenza** è la velocità con cui il segnale si ripete nel tempo, si misura in Hertz (Hz).

Un parametro equivalente è il periodo (T) del segnale, ossia il tempo che il segnale impiega per ogni ripetizione.

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

La **lunghezza d'onda (λ)** di un segnale è la distanza occupata da un singolo ciclo, o la distanza tra due punti della fase corrispondente di due cicli consecutivi.

Frequency domain concepts

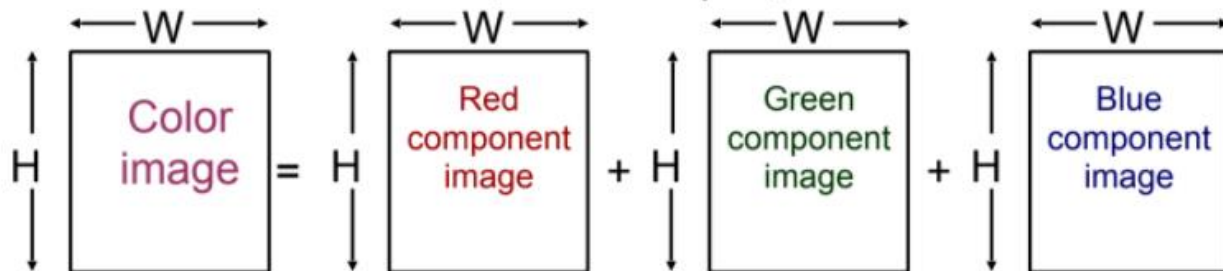
In pratica, un segnale elettromagnetico sarà fatto di molte frequenze.

Ad esempio, un'immagine a colori può essere descritta dalla combinazione lineare di tre segnali elettromagnetici con frequenze indicate nella gamma visibile:

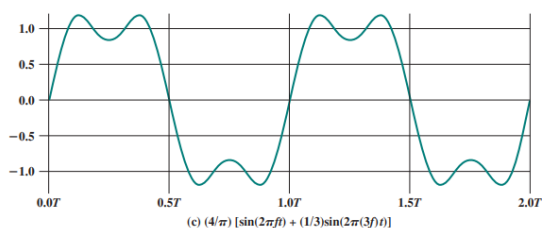
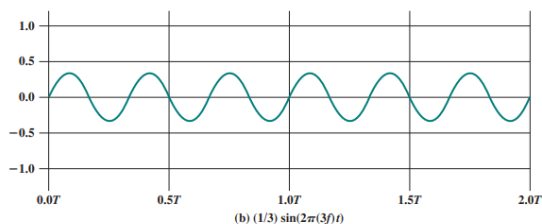
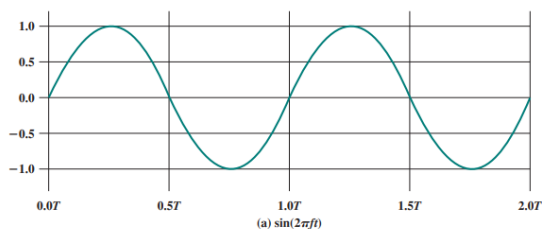
- **RED:** 428 THz (700 nm)
- **GREEN:** 566 THz (530 nm)
- **BLUE:** 638 THz (470 nm)

$$I(x,y) = r(x,y) \text{ RED} + g(x,y) \text{ GREEN} + b(x,y) \text{ BLUE}$$

$$(0 \leq x \leq W; 0 \leq y \leq H)$$



(a) e (b) rappresentano le componenti individuali del segnale, (c) l'unione.



Può essere dimostrato, attraverso la serie di Fourier, che ogni segnale è fatto di componenti a varie frequenze, in cui ogni componente è una sinusoide.

Il segnale elettromagnetico può essere visto come una collezione di segnali analogici (onde sinusoidali) a differenti ampiezze, frequenze e fasi.

Quindi possiamo dire che per ogni segnale c'è un dominio rispetto al tempo $s(t)$ che specifica l'ampiezza del segnale in ogni istante di tempo e un dominio rispetto la frequenza $s(f)$ che specifica ampiezza di picco delle frequenze costituenti il segnale.

Lo spettro di un segnale è il range delle frequenze che contiene.

DIGITAL RAPPRESENTATION OF INFORMATION

Le applicazioni attive nelle reti coinvolgono il trasferimento di un diverso tipo di informazioni. Alcune applicazioni coinvolgono il trasferimento di blocchi di caratteri di testo o e-mail per esempio.

Nel caso del testo, l'informazione è già in forma digitale. Nel caso della voce, l'informazione è analogica e deve essere convertita in forma digitale. Questa sezione si focalizza sul numero di bits richiesti per rappresentare i vari tipi di informazione, per esempio, testi, audio, data, immagini e video.

Nel caso di blocchi orientati di informazioni siamo interessati al numero di bits necessari per rappresentare un blocco.

Nel caso del flusso orientato di informazioni, siamo interessati al bit rate (ossia il numero di bits/secondo) richiesti per rappresentare le informazioni.

È utile identificare in quale strato del modello OSI abbiamo a che fare. In generale, l'informazione associata con un'applicazione è generata sopra un livello di applicazione. I blocchi e i flussi di informazioni generati dall'applicazione devono essere gestiti da tutti gli strati inferiori del protocol stack.

Infine, lo strato fisico deve effettuare il trasferimento di tutti i bit generati dall'applicazione e dagli strati sottostanti. In un certo senso, l'applicazione genera un flusso di informazioni che necessita di essere trasportato attraverso la rete; il sistema digitale di trasmissione a livello fisico fornisce i tubi che trasportano effettivamente i flussi di informazione attraverso la rete.

BLOCCHI ORIENTATI DI INFORMAZIONI

L'informazione può essere raggruppata in due categorie: l'informazione che in modo naturale viene trasmessa come un singolo blocco e il flusso di informazioni che è prodotto continuamente e che ha bisogno di essere trasmesso esattamente come è prodotto.

Esempio di informazione a blocchi: messaggio di testo, file di dati, immagine jpeg, file mpeg. Size = bits/block.

Esempio flusso di informazioni: la voce in tempo reale, un video in streaming. Bit rate = bits/second.

I blocchi di informazione possono avere un'ampiezza di pochi bytes o di centinaia di kilobytes e occasionalmente megabytes. In forma normale questi files contengono una discreta quantità di ridondanza statistica. La compressione dei data, fatta da programmi come zip, elimina questi bit in più ridondanti per decodificare l'informazione digitale in files che richiedono molti meno bits per essere trasferiti e che occupano meno spazio nel disco.

Certe applicazioni richiedono che un blocco di informazioni può essere spedito con un certo massimo di ritardo.

Il tempo per mandare un blocco di L bits di informazioni su un sistema di trasmissione di R bits/seconds consiste nella propagazione del ritardo e il tempo di trasmissione del blocco.

$$delay = t_{prop} + \frac{L}{R} = \frac{d}{c} + \frac{L}{R}$$

Dove:

L = numero di bit in un messaggio

R = velocità in bps del sistema di comunicazione digitale

L/R = tempo di trasmettere il messaggio

t_{prop} = tempo di propagazione del segnale attraverso il mezzo

d = distanza in metri

c = velocità della luce

Il tempo per trasmettere un file può essere ridotto incrementando R (ampiezza di trasmissione).

Si può utilizzare la compressione dei dati per ridurre L.

Utilizzare un modem a velocità superiore per aumentare R

Collocare più vicino all'end system per ridurre d.

La compressione

L'informazione di solito non è rappresentata in modo efficiente.

Gli algoritmi di compressione dati:

- rappresentano l'informazione usando pochi bit, eliminando quelli ridondanti.
- L'informazione originale viene recuperata esattamente (senza rumore).
- Se c'è rumore allora l'informazione è recuperata approssimativamente. Ci deve essere un compromesso tra numero di bit e qualità

Il rapporto di compressione:

- Compression ratio = bit(file originale) / bit (file compresso)

Perché DIGITAL COMMUNICATIONS?

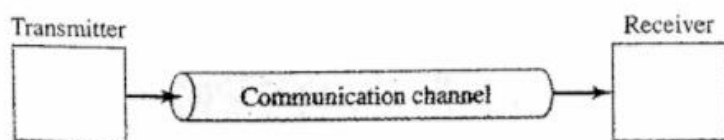


FIGURE 3.4 General transmission system.

CONFRONTO TRASMISSIONE ANALOGICA E DIGITALE

La trasmissione digitali ha dei costi vantaggiosi rispetto alla analogica quando questa avviene su una lunga distanza. Tuttavia, per trasmettere su lunga distanza bisogna necessariamente introdurre periodicamente dei ripetitori per compensare l'attenuazione e la distorsione del segnale.

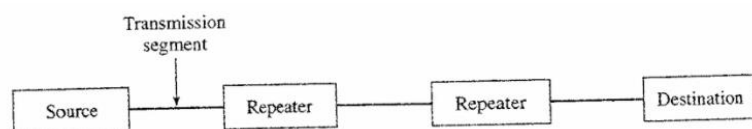


FIGURE 3.6 Typical long-distance link.

In un sistema di comunicazione analogico, il compito del ripetitore è di rigenerare il segnale che si avvicina il più possibile al segnale di input.

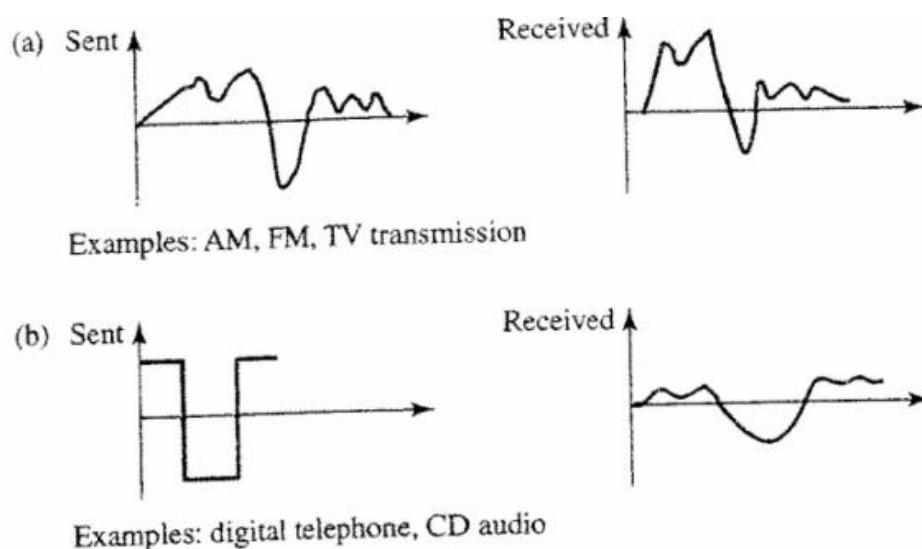
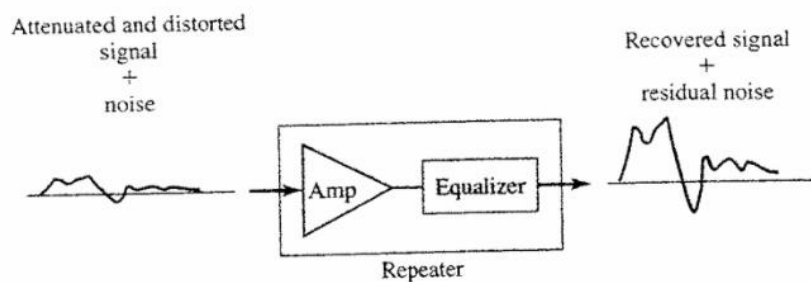


FIGURE 3.5 (a) Analog transmission requires an accurate replica of the original signal whereas (b) digital transmission reproduces discrete levels.

Quello che riceve il ripetitore è una versione attenuata e distorta del segnale originale in più è di solito presente del rumore in aggiunta al segmento. Il segnale originale è di solito molto più forte del rumore. Quindi se il segnale viene attenuato troppo il rumore può prendere il sopravvento. La funzione del ripetitore è di incrementare il potere del segnale affinché questo non accada. Prima di tutto il ripetitore deve risolvere il problema dell'attenuazione amplificando il segnale ricevuto. Tuttavia il segnale è ancora distorto.

Successivamente il ripetitore utilizza un dispositivo chiamato equalizzatore che ha il compito di eliminare la distorsione.



La fonte della distorsione ha due cause principali. La prima causa è che le componenti del segnale con diversa frequenza sono attenuate in modo differente. In generale componenti con alta frequenza sono più attenuate rispetto alle componenti con bassa frequenza.

La seconda causa è che componenti del segnale con diversa frequenza hanno ritardi differenti in base a come si propagano attraverso il canale.

Un rigeneratore digitale è richiesto per la trasmissione di segnali binari (numerici). L'obiettivo è di risalire con grande probabilità al segnale binario originale. Il rigeneratore può anche utilizzare un equalizzatore per compensare la distorsione introdotta dal canale. Tuttavia, il rigeneratore non ha bisogno di recuperare completamente la sfumatura originale del segnale trasmesso. L'unico bisogno è di determinare se l'impulso originale era positivo o negativo.

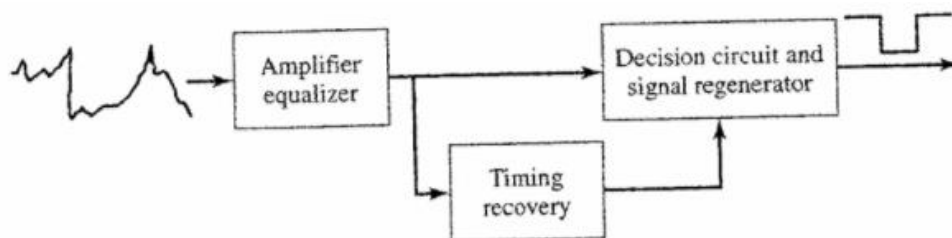


FIGURE 3.8 A digital regenerator.

Un circuito timing recovery tiene traccia degli intervalli che definiscono ogni impulso notando la transizione di istanti tra impulsi. Il circuito di decisione (decision circuit) poi campiona il segnale nel mezzo di ogni intervallo per determinare la polarità di ogni impulso. In un sistema ideale, in assenza di rumore, il segnale originario sarebbe riparato ogni volta e conseguentemente il flusso binario sarebbe rigenerato esattamente. Tuttavia, il rumore è inevitabile nei sistemi, questo comporta errori che sono tanto grandi quanto è forte il rumore che potrebbero cambiare la polarità del segnale originale nel punto di campionamento.

La riduzione del rumore è meglio risolta dalla trasmissione digitale che quindi ha una performance superiore rispetto ai segnali analogici. I rigeneratori digitali eliminano l'accumulo del rumore che è presente nei sistemi analogici e provvede per una trasmissione a lunga distanza che è quasi indipendente dalla distanza.

Le trasmissioni digitali possono operare con livelli di segnale più bassi o con distanze più grandi tra rigeneratori rispetto a quanto possono i segnali analogici. Questo fatto si traduce in costi complessivamente minori ed è stato il motivo originale dell'introduzione della trasmissione digitale.

Un altro vantaggio della trasmissione digitale sopra quella analogica è la possibilità di monitorare la qualità del canale di trasmissione mentre il canale è in servizio. Nei sistemi digitali, possono essere imposti

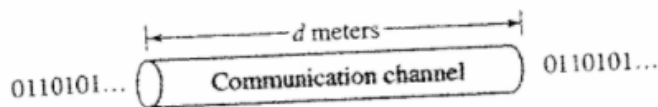
predeterminati modelli nella trasmissione delle informazioni. Controllando questi modelli è possibile determinare il tasso di errore nel canale complessivo. Un monitoraggio non intrusivo è molto più difficile nelle trasmissioni analogiche.

Con il tempo, altri benefici della trasmissione digitale sono diventati predominanti.

Le reti basati sulla trasmissione digitale possono moltiplicare e scambiare ogni tipo di informazione che può essere rappresentata in forma digitale. La trasmissione digitale permette inoltre alle reti di trasportare sia un maggior numero di informazioni sia di farlo con correzione di errori, decriptazione di dati e vari tipi di protocolli di rete.

3.2.2 Proprietà di base dei sistemi di trasmissione digitali

L'obiettivo principale della trasmissione digitale è di trasferire sequenze di 0 e 1 da un trasmettitore a un ricevitore:



Noi siamo particolarmente interessati alla velocità di trasmissione (**bit rate**), misurata in bits/secondo.

Questa viene indicata con R , come questo valore aumenta, il volume dell'informazione che può scorrere nel canale per secondo aumenta.

Il sistema di trasmissione usa impulsi o sinusoidi per trasmettere l'informazione binaria sopra un mezzo fisico di trasmissione. Una domanda fondamentale nella trasmissione digitale è quanto veloci i bits possono essere trasmessi in modo affidabile sopra un dato mezzo.

La capacità è chiaramente influenzata da diversi fattori inclusi:

- L'ammontare di energia utilizzata nella trasmissione di ogni segnale.
- La distanza che il segnale deve attraversare (poiché l'energia è dissipata e si disperde quando viaggia lungo il mezzo.)
- L'ammontare del rumore con cui il ricevitore deve avere a che fare.
- La larghezza di banda del canale di trasmissione.

Un canale di trasmissione può essere caratterizzato dal suo effetto sui segnali sinusoidali in ingresso (toni) di diverse frequenze. Una sinusoide di una data frequenza f (Hertz) è applicata all'ingresso e poi viene misurata quando esce dal canale.

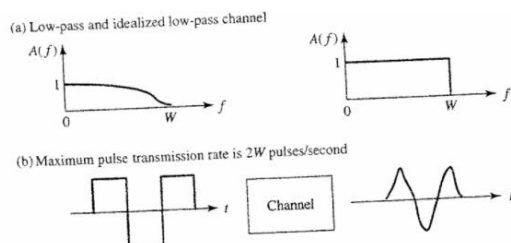


FIGURE 3.10 Typical amplitude-response functions.

Indichiamo la lunghezza di banda di un segnale W_s = è il range di frequenze contenute in un segnale.

W_c = è il range di frequenze in ingresso che passano nel canale.

La lunghezza di banda del segnale in ingresso è tanto grande quanto la lunghezza del canale.

Il massimo valore con cui un impulso può essere trasmesso in un canale è: $r_{\max} = 2W$ pulses/second.

Possiamo trasmettere l'informazione binaria inviando un impulso con ampiezza +A per mandare 1 e -A per mandare 0 bit.

Ogni impulso trasmette un bit di informazione, quindi questo sistema ha come velocità di trasmissione:

$$2 W \text{ pulses/second} \times 1 \text{ bits/pulse} = 2 W \text{ bits/second}$$

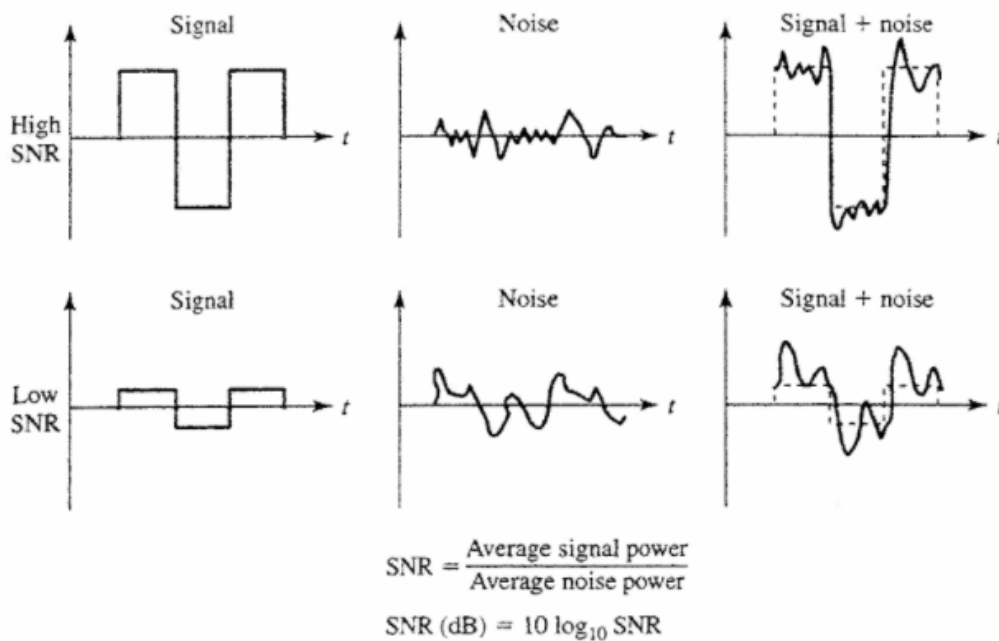
Possiamo incrementare la velocità di trasmissione mandando impulsi su più livelli. Per esempio gli impulsi possono prendere ampiezze nell'insieme $\{-A, -A/3, +A/3, +A\}$ per trasmettere le coppie di bit $\{00, 01, 10, 11\}$ poi ogni impulso trasmette due bits di informazione alla velocità di trasmissione di $4W$ bps.

Questo in generale utilizziamo la trasmissione multilivello con $M = 2^m$ ampiezze di livello, che possiamo trasmettere a una velocità di trasmissione:

$$R = 2W \text{ pulses/second} \times m \text{ bits/pulse} = 2Wm \text{ bits/second}$$

In assenza di rumore, la velocità di trasmissione può essere incrementata senza limiti aumentando il numero dei segnali di livello M .

Tuttavia, l'errore è presente, il **signal to noise ratio (SNR)**, misura le relative ampiezze del segnale desiderato e il rumore. (Unità di misura: decibels (dB)).



Questo errore aumenta esponenzialmente con il numero di bits che utilizzo.

La capacità del canale di trasmissione è il massimo valore con il quale i bits possono essere trasferiti in modo affidabile.

$$C = W \log_2(1 + SNR) \text{ bits/second}$$

SHANNON CHANNEL CAPACITY OF TELEPHONE CHANNEL

Consider a telephone channel with $W = 3.4$ kHz and $\text{SNR} = 10,000$. The channel capacity is then

$$C = 3400 \log_2(1 + 10000) = 45,200 \text{ bits/second}$$

The following identities are useful here: $\log_2 x = \ln x / \ln 2 = \log_{10} x / \log_{10} 2$. We note that the SNR is usually stated in dB. Thus if $\text{SNR} = 10,000$, then in dB the SNR is

$$10 \log_{10} \text{SNR dB} = 10 \log_{10} 10000 = 40 \text{ dB}$$

The above result gives a bound to the achievable bit rate over ordinary analog telephone lines when limited to a bandwidth of 3.4 kHz.¹²

3.3 DIGITAL RAPPRESENTATION OF ANALOG SIGNALS

L'informazione nei segnali analogici non è un insieme numerabile perché è una funzione continua nel tempo. Per riportare le informazioni in bit discretizziamo dominio e codominio: processo di discretizzazione.

La digitalizzazione del segnale analogico come voce e audio coinvolge due steps:

- 1) Prendere un intervallo di campionamento in cui studiare le forme d'onda del segnale analogico, in t seconds finiti.
- 2) Rappresentare ogni campione utilizzando un numero finito di bit, detti m bits.

Processo di rappresentazione da analogico a digitale:

- Campionamento (sampling) : ottengo campioni (discreti) $x(t)$ ad intervalli di tempo uniformemente distanziati
- Quantizzazione
- Codifica: assegno una sequenza di bit ad ogni simbolo quantizzato.

Quantizzazione e codifica sono di solito eseguiti insieme, insieme alla compressione.

3.3.1 Lunghezza di banda dei segnali analogici

Molti segnali che si trovano in natura sono periodici e possono essere rappresentati come la somma di segnali sinusoidali. Per esempio, il suono della voce consiste nella somma di onde sinusoidali a una frequenza fondamentale.

Questi segnali analogici hanno la forma:

$$x(t) = \sum a_k \cos(2\pi k f_0 t + \phi_k).$$

3.3.2 Campionamento di un segnale analogico

Immaginiamo di avere una funzione analogica $x(t)$ che ha uno spettro con lunghezza di banda W .

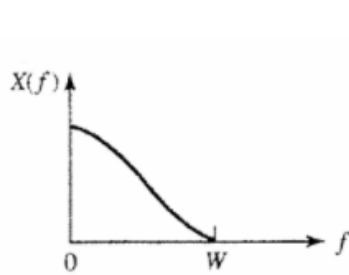


FIGURE 3.17 Spectrum of analog bandwidth W Hz.

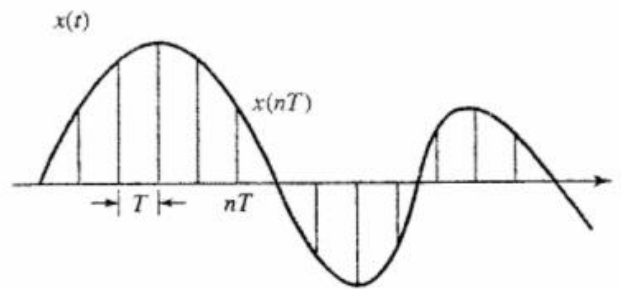


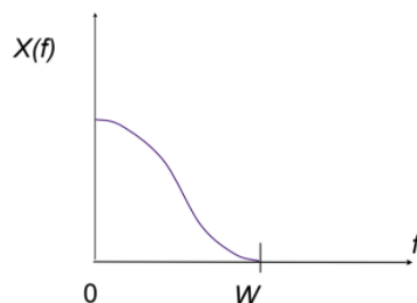
FIGURE 3.18 Sampling of an analog signal.

Un segnale $x(t)$ è detto a banda-limitata con lunghezza di banda W se la sua trasformata di Fourier soddisfa $X(f) = 0$ per $|f| \geq W$

- Fourier transform

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i2\pi ft} df$$

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt$$



Per convertire il segnale in forma digitale, dobbiamo partire con il prendere intervalli di campionamento con ampiezza di segnale ogni T secondi per ottenere $x(nT)$, con n valori interi.

Poiché il segnale varia in continuazione nel tempo, otteniamo una sequenza di numeri che per ora assumiamo abbiano un infinito livello di precisione.

Intuitivamente sappiamo che se i campioni sono presi abbastanza frequentemente in relazione a come varia il segnale, possiamo arrivare ad una buona approssimazione. Così il processo di campionamento rimpiazza la funzione del tempo con una sequenza di numeri reali.

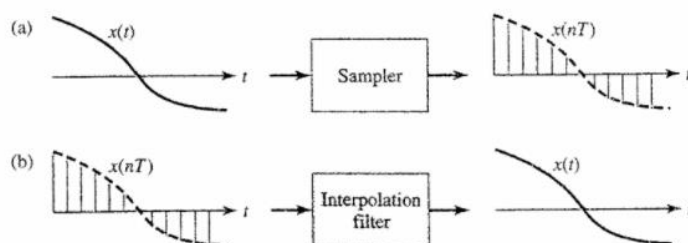


FIGURE 3.19 (a) Sampling of signal $x(t)$; (b) recovery of original signal $x(t)$ by interpolation.

Le domande che sorgono spontanee sono: non sto perdendo informazioni? Secondo quale criterio scelgo T (tempo di campionamento)?

Un risultato sorprendente è che possiamo recuperare il segnale originale $x(t)$ dalla sequenza $x(nT)$ precisamente fin quanto la frequenza di campionamento è più grande di un qualche minimo valore.

Il campionamento si deve effettuare rispettando alcune regole per non perdere l'informazione. In altri termini il segnale analogico deve essere campionato in modo da rendere possibile in ricezione la propria ricostruzione. Viene definita la frequenza di Nyquist necessaria per campionare un segnale analogico senza perdere informazioni.

Teorema del campionamento

Il teorema del campionamento è un risultato matematico che afferma che se la frequenza di campionamento di un qualsiasi segnale è maggiore di due volte la frequenza massima dello stesso segnale: $1/T > 2W$ allora è possibile fare una ricostruzione perfetta.

Ove $2W$ = frequenza di campionamento di Nyquist.

La ricostruzione di $x(t)$ viene effettuata interpolando i campioni $x(nT)$ in accordo con la formula:

$$x(t) = \sum_n x(nT) s(t - nT)$$

where the interpolation function $s(t)$ is given by

$$s(t) = \frac{\sin 2\pi W t}{2\pi W t}$$

Se si campiona a una frequenza inferiore di $2W$ allora il segnale ricostruito sarà distorto.

Il fenomeno dell'aliasing

Si formano delle "code" nello spettro del segnale quando la frequenza è minore di $2W$. La presenza di code sovrapposte allo spettro comporta che quando lo faccio passare attraverso il filtro, lo spettro che otterrò sarà diverso (il segnale risulterà distorto).

Il fenomeno delle code che si sovrappongono si chiama *aliasing* $\rightarrow \frac{1}{T} > 2W$

3.3.3 Trasmissione digitale dei segnali analogici

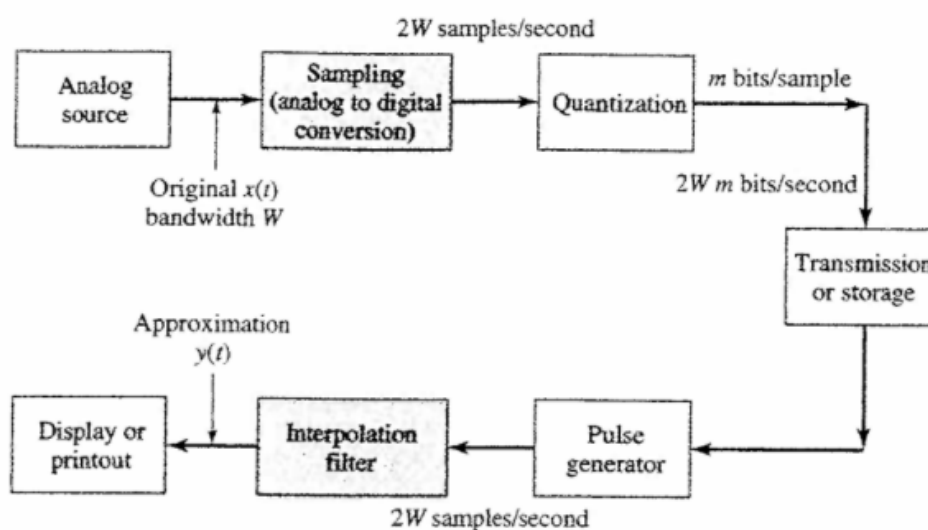


FIGURE 3.20 Digital transmission of analog signal.

La figura mostra la disposizione standard nella gestione delle informazioni analogiche (e memorizzazione= da parte del sistema di trasmissione digitale.

Il segnale viene prodotto da una sorgente analogica $x(t)$ che assumiamo limitata a W Hz, questo segnale viene campionato con la frequenza di Nyquist producendo una sequenza di campioni alla velocità di $2W$ samples/second. Questi campioni hanno infinita precisione, per questo sono poi messi in un quantizzatore che approssima il valore del campione utilizzando m bits per produrre un'approssimazione senza una specifica accuratezza. Il livello di accuratezza determina il numero di bits m che il quantizzatore utilizza per specificare l'approssimazione. La velocità di trasferimento del quantizzatore è $2Wm$ bits/second (i campioni $2W$ samples/second e ogni campione richiede m bits).

A questo punto abbiamo ottenuto una rappresentazione digitale del segnale analogico originale senza una specifica accuratezza o qualità. Questa rappresentazione digitale può essere memorizzata o trasmessa per un qualsiasi numero di volte senza un'addizionale distorsione finché nessun errore si intromette nella rappresentazione digitale.

L'approssimazione del valore del campione è ottenuta una sequenza di gruppi di m bits, e da una sequenza di impulsi stessi con la corrispondente ampiezza che viene generata. Alla fine, il sistema di interpolazione è guidato da una sequenza di impulsi stretti per generare un segnale analogico che approssima il segnale originale senza accuratezza. Questo processo viene applicato in egual modo sia allo storage che al transmission of analog information.

L'accuratezza nell'approssimazione è determinata nel processo della quantizzazione. Il compito della quantizzazione è di prendere campioni $x(nT)$ e produrre un'approssimazione $y(nT)$ che può essere specifica usando un fissato numero di bits/sample. In generale, si quantizza un certo numero, detto, $M = 2^m$, di valori approssimati che sono usati per rappresentare l'input quantizzato.

Per ogni input $x(nT)$ viene trovato il punto di approssimazione più vicino, e l'indice del punto di approssimazione è specificato usando m bits. Si assume che il decodificatore abbia un insieme di valori approssimati in modo tale che il decodificatore può recuperare i valori dagli indici.

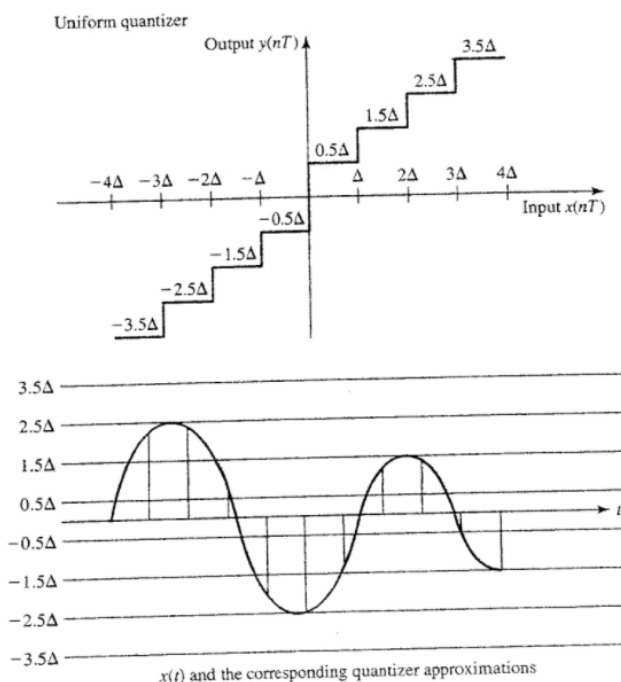


FIGURE 3.21 A uniform quantizer.

In figura il più semplice tipo di quantizzazione, the uniform quantizer, in cui il range di ampiezze del segnale è coperto da eguali valori di approssimazione. Il range $\{-V, V\}$ è diviso in 2^m intervalli di lunghezza uguale Δ , e quindi abbiamo $2V = 2^m \Delta$. Quando l'input $x(nT)$ cade in un dato intervallo, allora poi il suo valore

approssimato $y(nT)$ è il punto medio dell'intervallo. L'output della quantizzazione sono semplicemente gli m bits che specificano l'intervallo.

$$M = 2^b \quad \Delta = \frac{2V}{M}$$

$$\text{Errore massimo} = \frac{\Delta}{2}$$

$$\text{Errore quadratico medio per la distribuzione uniforme } x = \frac{\Delta^2}{12}$$

In generale, il valore approssimato non è uguale al valore del segnale originale, quindi si introduce un errore nel processo di quantizzazione. Quando la lunghezza dell'intervallo Δ è piccolo, allora l'errore della quantizzazione è piccolo e può essere visto come una semplice aggiunta di "rumore" al segnale originale.

Quantizzare vuol dire suddividere l'asse delle ordinate in intervalli di ampiezza Δ e approssimare il segnale al valore di Δ vicino al campione reale. L'errore che commetto è rappresentato dalla distanza tra il livello scelto e il valore reale del campione.

Un primo criterio per scegliere Δ è fissare l'errore massimo. Se l'errore massimo non ci basta, allora basta prendere Δ più piccolo e quindi rendere i livelli di quantizzazione più fitti.

Più Δ è grande più saranno gli errori che commetteremo per quantizzare, quindi conviene scegliere un Δ basso.

In figura abbiamo 8 livelli che rappresentano 8 simboli possibili. Se abbiamo una codifica a lunghezza costante (stesso numero di bit per ogni simbolo), quanti bit mi servono per etichettare 8 livelli?

$$\log_2 8 = 3 \text{ bit}$$

Se avessi M livelli, quanti bit mi servirebbero? $\log_2 M$

Quant'è il bit rate? $R_s = \text{bit rate} = \text{bit/sample} * \text{samples/second}$

Funzione quantizzazione: $q(x_k) = x_k + e_k$

Questa porta un errore:

SNR (quantizer signal-to-noise ratio)

$$\text{SNR} = \frac{\text{average signal power}}{\text{average noise power}} = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_e^2} \quad \text{SNR}_q = \frac{E[x_k^2]}{E[e_k^2]} = \frac{P_x}{P_e}$$

$$\text{SNR} = \frac{\sigma_x^2}{\Delta^2/12} = \frac{12\sigma_x^2}{(2V/M)^2} = 3 \left(\frac{\sigma_x}{V} \right)^2 2^{2b}$$

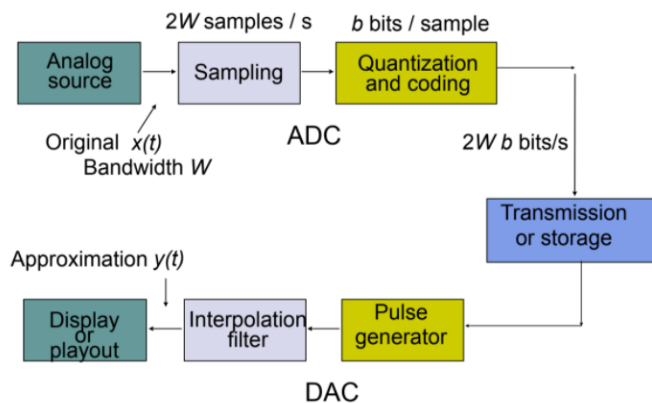
Viene utilizzato per dire quanto errore introduce il quantizzatore.

SNR per un uniform quantizer:

$$\begin{aligned} \text{SNR dB} &= 10 \log_{10} \sigma_x^2 / \sigma_e^2 = 6m + 10 \log_{10} 3\sigma_x^2 / V^2 \\ &\approx 6m - 7.27 \text{ dB for } V/\sigma_x = 4 \end{aligned}$$

Questo dice che ogni bit aggiuntivo usato nella quantizzazione incrementerà l'SNR di 6 dB. Il risultato è intuitivo, in quanto ogni bit aggiuntivo duplica il numero di intervalli, e quindi per un dato range $\{-V, V\}$, gli intervalli sono ridotti a metà.

Riassunto trasmissione digitale informazione analogica



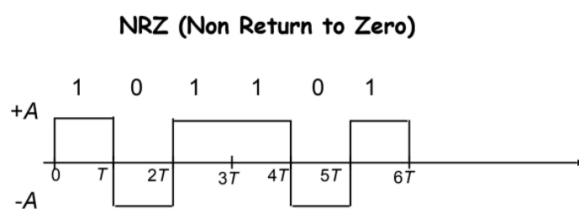
La sorgente analogica emette un segnale $x(t)$ che porta l'informazione di banda W . Lo si campiona ($2W$ campion/s), quantizza (b bit/campione) e codifica ($2Wb$ bit/s). Si trasmette/memorizza il segnale risultante al generatore di impulsi, poi al filtro di interpolazione che approssima fedelmente il segnale con $y(t)$ che verrà utilizzato dall'utente finale.

Di tutti i portatori di informazione chi decide l'SNR? L'utente.

Il segnale digitale binario

Una complicazione dei segnali numerici è la temporizzazione. I bit sono entità discrete, quando vengono portati su un segnale discreto, vuol dire che si mapperà 1 bit su un intervallo di tempo. La durata di questo intervallo di tempo deve essere esplicitata.

È necessario partizionare l'asse dei tempi in intervalli T (in ogni intervallo si decide che tipo di bit si riceve) cercando di sincronizzarlo con il segnale, questo si fa attraverso un crono-segnale (segnale periodico che mi dice in quali istanti devo andare a guardare, quando il segnale è alto o basso). Senza il crono segnale la forma d'onda non è interpretabile.



Bit rate = 1 bit / T seconds

Signal is meaningless without associated clock

bit rate = 1 bit/T secondi

il segnale è privo di significato senza clock associato.

È necessario avere il clock.

La NRZ è la codifica più semplice che associa un valore alto al bit 1 e un valore basso al bit 0.

LA CARATTERIZZAZIONE DEI CANALI DI COMUNICAZIONE

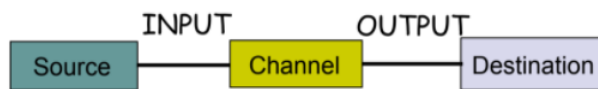
Un canale di comunicazione è un sistema caratterizzato da un mezzo fisico con annesso un equipaggio di componenti elettroniche o ottiche che possono essere usate per la trasmissione delle informazioni.

I mezzi fisici più utilizzati sono i fili di rame, mezzo radio, fibre ottiche ecc.

La trasmissione digitale consiste nella trasmissione di sequenze di impulsi che sono determinati da una corrispondente sequenza digitale, ossia una serie di binari 0 e 1.

La trasmissione analogica coinvolge la trasmissione di onde che corrispondono a qualche segnale analogico, come ad esempio audio di un microfono o video.

Un generico sistema di comunicazione può essere modellato come una tripla:



■ fonte, canale e destinazione.

È un sistema ingresso-uscita.

Il modello del canale di comunicazione

Di solito si assumono due proprietà di base dei canali:

- *Linearità*

$$y_1(t) = Ch[x_1(t)], y_2(t) = Ch[x_2(t)] \rightarrow y_1(t) = Ch[x_1(t) + x_2(t)]$$

Un sistema è lineare se vale la sovrapposizione degli effetti.

- *Stazionarietà*

$$y_1(t) = Ch[x_1(t)] \rightarrow y_1(t - d) = Ch[x_1(t - d)]$$

Un sistema è stazionario (o tempo invariante) se la risposta del canale non dipende dall'istante in cui si applica l'input.

Un esempio di canale non stazionario: radiomobile.

I canali di comunicazione hanno due domini di rappresentazione: dominio della frequenza e dominio del tempo.

Linear Time Invariant (LTI) channel

Ci concentreremo sui canali LTI (lineari tempo invarianti). Non cambia la risposta applicando l'input in istanti diversi.

$$x(t) \rightarrow \text{LTI CHANNEL} \rightarrow y(t)$$

Canale ideale

Un canale è ideale quando $y(t)$ conserva la forma d'onda $x(t)$. Ossia $x(t) = y(t)$, questo va bene anche se il segnale in output è uguale a quello in input ma traslato.

Le caratteristiche di un canale ideale sono:

- Guadagno costante
- Ritardo costante

$$y(t) = Gx(t - \tau)$$

In generale la relazione input-output è molto più complessa.

Frequency domain characterization

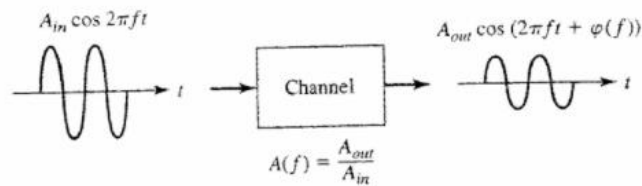


FIGURE 3.23 Channel characterization—frequency domain.

Applichiamo un segnale sinusoidale

$$x(t) = A_{in} \cos(2\pi ft)$$

che oscilla alla frequenza di f cicli/secondo (Hertz) al canale.

L'output del canale $y(t)$ consiste di solito in un segnale sinusoidale della stessa frequenza ma con una diversa ampiezza o fase.

$$y(t) = A_{out} \cos(2\pi ft + \varphi(f))$$

Quindi il canale è caratterizzato dagli effetti sul segnale in input.

Il primo effetto coinvolge l'attenuazione del segnale. Questo effetto è caratterizzato dall' $A(f)$ (amplitude-response function).

$$A(f) = \frac{A_{out}(f)}{A_{in}(f)}$$

Il secondo effetto è lo sfasamento del segnale. Questo è caratterizzato da $\varphi(f)$.

Entrambi gli effetti dipendono dalla frequenza del segnale.

Proprietà fondamentale dei canali LTI:

- Applicando un input sinusoidale alla frequenza f : l'output resta una sinusoide a frequenza f : di ampiezza modificata e fase traslata, ma stessa frequenza.

Nel dominio complesso:

$$x(t) = e^{i2\pi ft} \longrightarrow \boxed{\text{LTI Channel}} \longrightarrow y(t) = H(f) \cdot e^{i2\pi ft}$$

$$\text{Transfer function: } H(f) = A(f) \cdot e^{i\phi(f)}$$

Se un seno rimane seno, cosa succede a un segnale generico?

Passando dal dominio del tempo a quello della frequenza $x(t) \leftrightarrow X(f)$ si ha:

$$Y(f) = H(f)X(f)$$

$H(f)$ viene chiamata **funzione di trasferimento**, è una caratteristica di un particolare sistema LTI.

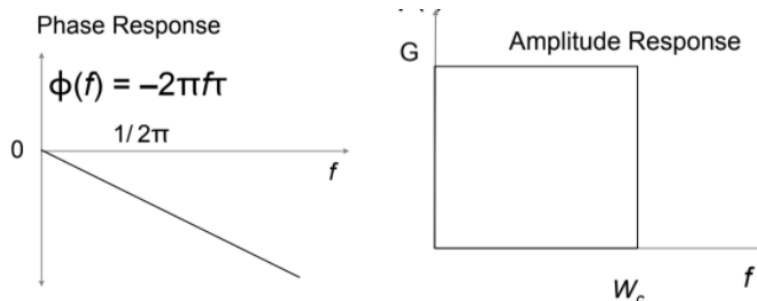
Lo spettro del segnale in uscita è semplicemente il prodotto dello spettro del segnale in ingresso per la funzione di trasferimento. Se la funzione di trasferimento è nulla, anche lo spettro in uscita sarà nullo.

Canali di tipo passa-basso (low-pass channel)

In questo tipo di canali passano frequenze molto basse e quelle alte vengono eliminate.

Tutte le sinusoidi con frequenza $0 \leq f \leq W_c$ passano con guadagno costante G e ritardo fisso τ ; le sinusoidi con frequenze $f > W_c$ vengono bloccate.

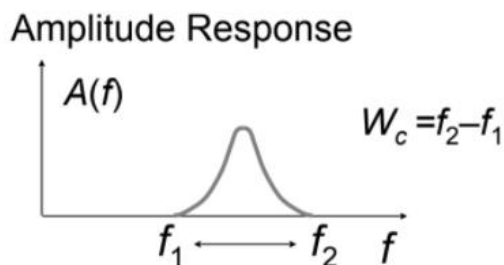
- $H(f) = Ge^{-i2\pi f\tau} \quad 0 \leq f < W_c, H(f) = 0 \text{ for } f > W_c$
- $A(f) = G \text{ for } f < W_c \text{ and } A(f) = 0 \text{ for } f > W_c$
- $\phi(f) = -2\pi f\tau$



Canali passa-banda

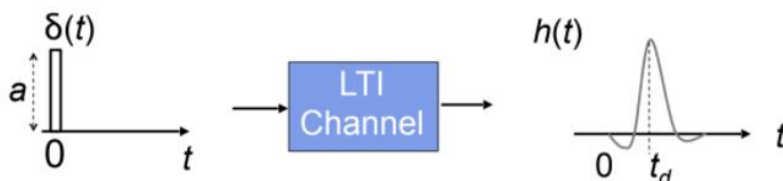
È un canale dove passano frequenze nell'intervallo f_1 a f_2 invece di frequenze basse.

La lunghezza di banda per questo tipo di canale è $W_c = f_2 - f_1$



Alcuni canali fanno passare segnali all'interno di una banda che esclude basse frequenze: ADSL modems, sistemi radio, canali di fibre ottiche.

Time domain characterization



Al canale viene applicato un impulso molto stretto al tempo $t = 0$, di ampiezza a e durata estremamente ridotta. L'energia associata all'impulso appare nell'output del

canale come un segnale $h(t)$ e viene definita RISPOSTA IMPULSIVA.

Nella trasmissione digitale siamo interessati nel massimizzare il numero di impulsi trasmessi per secondo in modo tale da massimizzare la velocità con cui le informazioni possono essere trasmesse. Allo stesso tempo siamo interessati a minimizzare il tempo T tra due impulsi consecutivi in input.

Si può far vedere che la funzione di trasferimento è la trasformata di Fourier della risposta impulsiva:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-i2\pi ft} dt$$

$h(t)$ è la risposta del sistema all'input $\delta(t)$, viene chiamata **risposta impulsiva**.

La risposta a un generico segnale di tempo continuo $x(t)$ applicato ad un canale LTI è

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau$$

$x(t)$ può essere pensato come la somma di impulsi ai tempi τ con $(-\infty < \tau < \infty)$ con ampiezza $x(\tau)$, quindi $y(t)$ è la somma delle risposte $x(\tau)h(t - \tau)$.

Quindi un sistema LTI crea un legame tra input e output:

- Nel caso del dominio rispetto alla frequenza:

$$Y(f) = H(f)X(f)$$

- Nel caso del dominio rispetto al tempo:

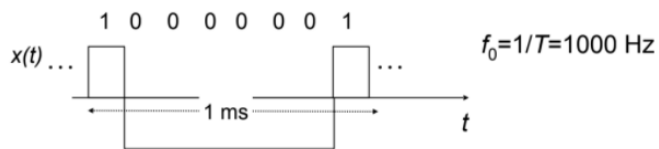
$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau$$

C'è un legame tra funzione di trasferimento e risposta impulsiva: la funzione di trasferimento è la trasformata di Fourier della risposta impulsiva.

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-i2\pi ft} dt$$

Un sistema ideale fa sì che l'uscita è uguale all'ingresso, con un canale LTI non è detto. Il fatto che il segnale in uscita venga diverso da quello in ingresso, viene chiamato distorsione. A volte questa è voluta, perché magari se voglio eliminare tutte le componenti frequenziali oltre W , altre volte no.

Esempio (Amplitude Distortion):



Tra il 700-800 si sono accorti che le funzioni si potevano rappresentare come sovrapposizione di seni e coseni, una serie infinita (per capire da dove nasce la serie di Fourier). Ad esempio, questa funzione, periodica nel tempo, potrebbe

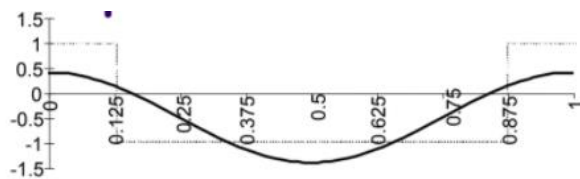
essere descritta da:

$$x(t) = -0.5 + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k} \sin\left(\frac{k\pi}{4}\right) \cos(2\pi k f_0 t) = -0.5 - \frac{2}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \cos(2\pi t \cdot f_0) + \frac{2}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{4}\right) \cos(2\pi t \cdot 2f_0) - \frac{4}{3\pi} \sin\left(\frac{3\pi}{4}\right) \cos(2\pi t \cdot 3f_0) + \dots$$

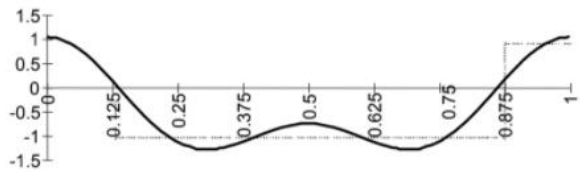
In questo caso in particolare, l'argomento di seno e coseno è caratterizzato ogni volta dalla presenza di multipli di f_0 , che viene chiamata frequenza fondamentale ($f_0 = \frac{1}{T} = 1000 \text{ Hz}$).

Facciamo passare questo segnale in un canale LTI, quello che esce è una funzione finita che viene interrotta quando si raggiunge W_c , taglia tutti i termini al di sopra di questi.

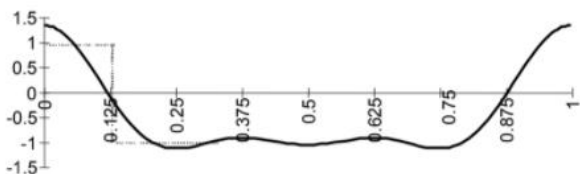
Se taglio sempre di meno l'output è sempre più simile a $x(t)$.



a) $W_c = 1.5 \text{ kHz}$



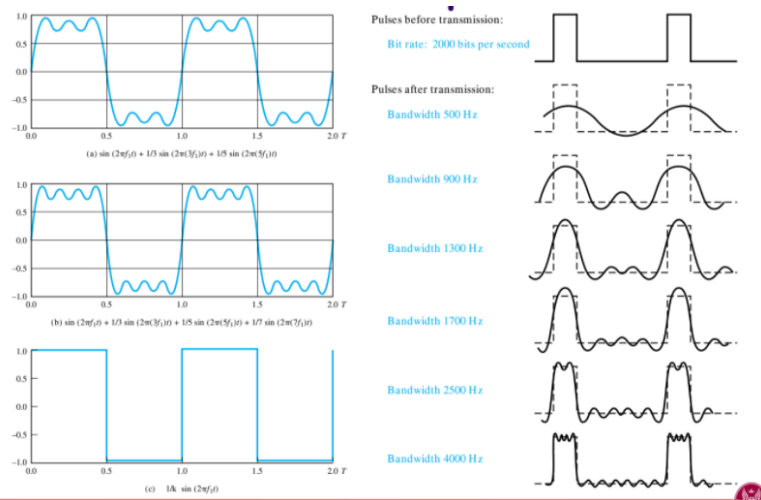
b) $W_c = 2.5 \text{ kHz}$



c) $W_c = 4.5 \text{ kHz}$

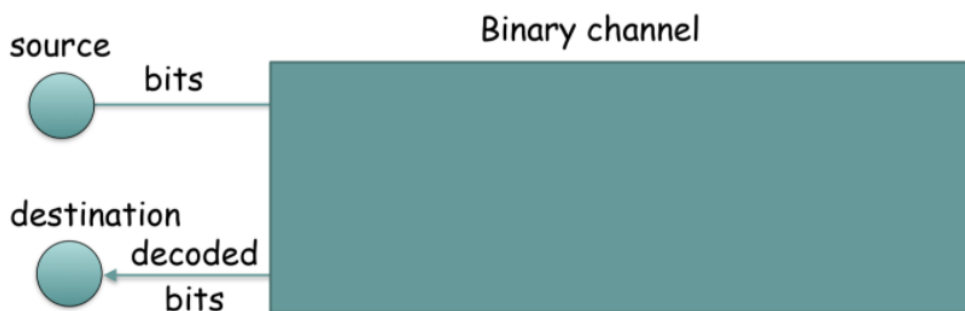
Come la lunghezza di banda aumenta, l'output del canale riproduce l'input meglio.

Altro esempio, in base a W_c avremo un segnale di output più o meno distorto.



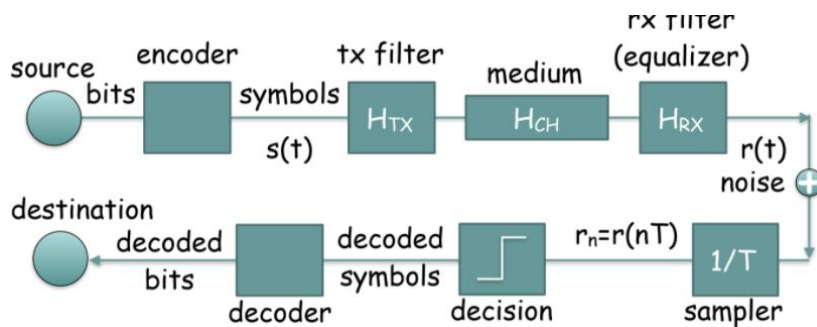
BASEBAND COMMUNICATIONS

Come trasferiamo i bit?



La situazione iniziale è un'astrazione in cui entrano bit in un canale ed escono bit che vengono ricevuti dal ricevitore.

Entrando nel dettaglio:



Nel trasmettitore troviamo due funzioni: la codifica (da bit a simboli, in quanto i bit non esistono in natura e ho bisogno di segnali. Ad esempio, per un bit 1 c'è un livello di tensione alto, 0 livello di tensione basso) e il filtro. Il mezzo è il canale di comunicazione (fibra ottica ecc.) .

L'equalizzatore ricostruisce il clock.

LTI channels and pulse transmission

Il segnale che uno produce in input è formato da tanti impulsi, ognuno con un intervallo di simbolo (possiamo associarlo al clock).

$$\text{Input: } s(t) = \sum_k A_k \delta(t - kT)$$

Il valore dell'intervallo è indicato da A_k , l'input viene passato attraverso

tx filter + medium + rx filter = LTI channel

alla fine di questo percorso l'output può essere rappresentato matematicamente come:

$$\text{Output: } r(t) = \sum_k A_k h(t - kT)$$

Ove h è la risposta impulsiva dei tre sistemi LTI (tx filter, medium, rx filter). Il segnale che si riceve contiene degli errori, è una versione distorta + un rumore aggiuntivo.

$$r(t) = \sum_k A_k h(t - kT) + z(t)$$

Il rumore è indipendente dal segnale principale, però lo disturba.

Noi dobbiamo analizzare questo segnale intervallo per intervallo e prelevare un valore da ognuno di essi e capire cosa ci vuole trasmettere.

L'interferenza intersimbolica (ISI)

L'ISI è un disturbo additivo del segnale utile, analogamente al rumore termico.

Quindi andiamo a campionare l'uscita del canale al tempo nT (istante n del clock nell'intervallo T) e otteniamo:

$$r_n = r(nT) = \sum_k A_k h_{n-k} + z_n$$

$$r_n = A_n h_0 + \sum_k A_k h_{n-k} + z_n$$

r_n = uscita campionata

$A_n h_0$ = termine utile (ciò che voglio leggere all'istante n)

$\sum_k A_k h_{n-k}$ = ISI (interferenza inter-simbolica) deriva dalle code degli impulsi oltre l' n -esimo (disturbo additivo che dipende dal segnale)

z_n = disturbo campionato (indipendente dal segnale)

L'ISI è l'interferenza indesiderata proveniente da code di impulsi diversi dal n-esimo e che conferisce contributi non nulli al n-esimo campione di uscita.

Si può eliminare l'ISI?

Sappiamo che l'ISI dipende da h , ossia l'insieme delle risposte impulsive dell'LTI composto da tre blocchi due dei quali li progettiamo, quindi posso farlo ottimizzandoli scegliendo $h = 0$.

La condizione di Nyquist per annullare l'ISI

A noi interessa la conseguenza necessaria di questo teorema.

Per poter annullare l'ISI implica che:

$$|s| = 0 \rightarrow T_s \geq \frac{1}{2W_c}$$

$$F_s = \frac{1}{T_s} \leq 2W_c \rightarrow F_s \leq 2W_c$$

Ove questa frequenza è chiamata boud rate.

Il ritmo con cui vanno i simboli deve essere minore o uguale a 2 volte la banda del canale.

Non bisogna confondere questa formula con la condizione del campionamento. Quest'ultimo è già stato fatto nella source, momentaneamente ci stiamo occupando solamente del trasferimento di bit.

Motivo per cui si paga molto per avere più banda.

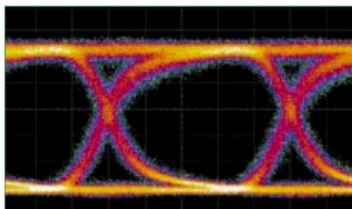
Il rumore non si può eliminare.

Riassumendo

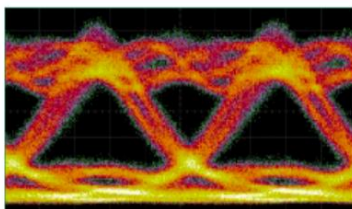
- Il trasmettitore sceglie simboli A_k
- Non più di $2W_c$ simboli possono essere trasmessi per avere ISI = 0
- Dopo l'equalizzazione e sincronizzazione, il ricevitore rileva: $y_k = h_o A_k + z_k$ (questo vale se elimino l'ISI)
- La decisione di come scegliere A_k si basa dall'osservazione di y_k .

Ogni simbolo porta un numero di bit pari a: $b = \log_2 N$

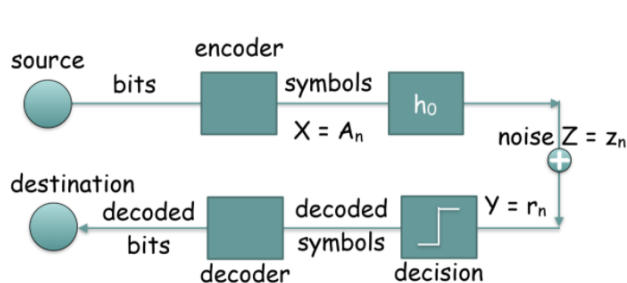
$$R_b \leq F_s * \log_2 N \leq 2W_c * \log_2 N$$



A) 10 Gbit/s di segnale senza dispersione (ISI trascurabile)



B) 10 Gbit/s di segnale dopo una trasmissione attraverso un canale dispersivo (ISI non trascurabile).



Processo di trasferimento dei bit senza ISI, canale LTI equalizzato.

LIMITI FONDAMENTALI DELLA TRASMISSIONE DIGITALE

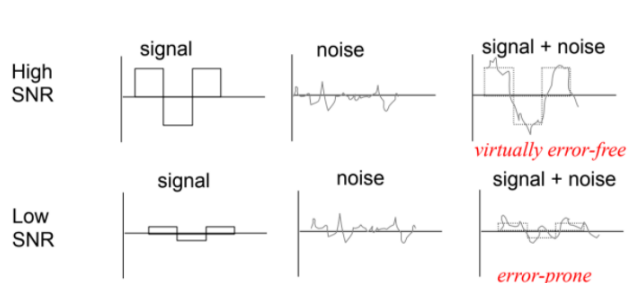
Tutti i sistemi fisici hanno rumore

- Gli elettroni vibrano sempre a una temperatura non nulla.

La presenza di rumore limita l'accuratezza della misurazione dell'ampiezza del segnale ricevuto.

Gli errori si verificano se la "separazione" di simbolo è paragonabile a livello di rumore.

Il rumore pone un limite su quanti livelli di ampiezza possono essere utilizzati nella trasmissione ad impulsi.



Possiamo usare sempre l'SNR per quantificare la bontà di un collegamento numerico dato in dB.

Il termine nasce proprio dalla ricezione.

$$\text{SNR} = \frac{\text{Average Signal Power}}{\text{Average Noise Power}}$$

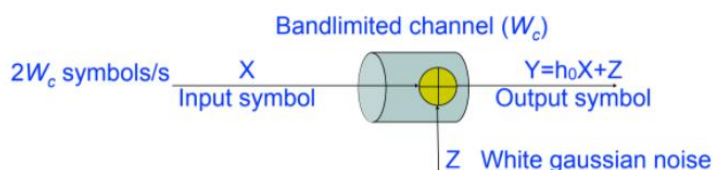
$$\text{SNR (dB)} = 10 \log_{10} \text{SNR}$$

AWGN MODEL

Dato che avendo eliminato l'ISI, il segnale è composto da due parti : uno proporzionale al simbolo che vogliamo leggere e l'altro è il rumore. Possiamo dare un modello di questo sistema chiamato AWGN.

L'uscita y è proporzionale all'ingresso x più un rumore, che è una variabile aleatoria. L'AWGN ci dice che questa variabile aleatoria è una gaussiana.

La varianza di questa variabile è la potenza del rumore.



Un canale LTI equalizzato è descritto da un modello AWGN:

$$Y = h_0 X + Z$$

Abbiamo soppresso l'ISI, il rumore (bianco = indipendente) è quello termico questo è noto ed è descritto dalla gaussiana.

Consideriamo il caso particolare per cui X rappresenta solo due segnali: alto o basso.

Input: $X = A$ o $-A$

Output: $Y = h_0 X + Z$

- se $X = A \rightarrow Y = h_0 A + Z$
- se $X = -A \rightarrow Y = -h_0 A + Z$

La regola di decisione che si utilizza è di mettere una soglia a 0 e compariamo Y a questa:

- $y > 0 \rightarrow$ si decide che $X' = A$
- $y < 0 \rightarrow$ si decide che $X' = -A$

Si ha un errore se la decisione $X' \neq X$

Questo avviene quando ad esempio:

trasmetto $X = -A$, ricevo $Y = -h_0 A + Z$.

Vado a confrontare Y con la soglia zero:

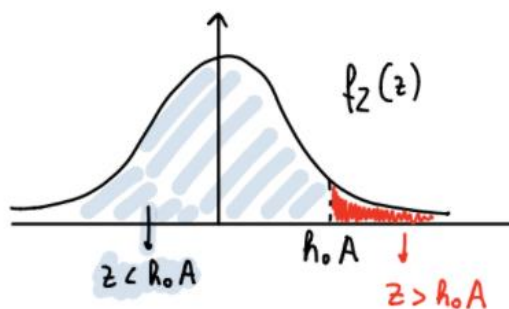
se $y < 0$ allora dico che è stato trasmesso $X = -A$, quindi ho indovinato.

Ma potrebbe capitare anche $y > 0$, quindi commetto un errore.

Con che probabilità Y venga negativo?

$$P(Y < 0) = P(h_0 A + Z < 0) = P(Z < -h_0 A)$$

Poiché Z è gaussiana



L'area in rosso è la condizione per cui la probabilità che Y non venga negativo non è verificata.

Quindi c'è una certa probabilità che si commettano degli errori, gli errori avvengono nel ricevitore in particolare quando applico una regola di decisione.

Calcolo della probabilità di errore

- Ho due livelli di segnale, $+A$ e $-A$, canale AWGN

$$Y = \pm A h_0 + Z$$

$$P(Y > 0 | X = -A) = P(Z > h_0 A) = Q\left(\frac{h_0 A}{\sigma}\right) = Q(\sqrt{SNR})$$

$$P(Y < 0 | X = A) = Q(\sqrt{SNR})$$

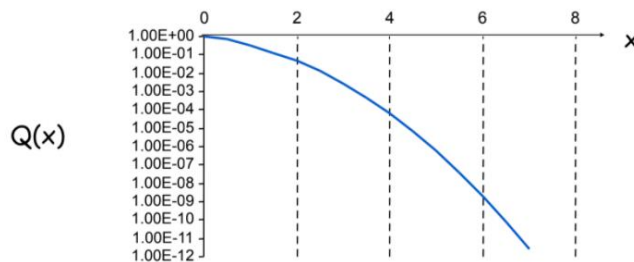
$$P_e = P(Y < 0|X = A) * P(X = A) + P(Y > 0|X = -A) * P(X = -A) \\ = Q(\sqrt{SNR}) * [P(X = A) + P(X = -A)] = Q(\sqrt{SNR})$$

$P_e = Q(\sqrt{SNR})$, probabilità che un simbolo venga interpretato in maniera sbagliata

Dove $Q(x) = \frac{1}{2\pi} * \int_x^\infty e^{-\frac{u^2}{2}} du$ ossia è l'area della zona rossa.

Questo risultato vale per il canale AWGN binario. Sottolinea l'importanza dell'SNR.

La probabilità di un simbolo decade esponenzialmente:



$$P_e = Q(\sqrt{SNR}) \leq \frac{1}{2} e^{-\frac{SNR}{2}}$$

Se si ha probabilità ½ si distruggono le informazioni.

È importante tenere l'SNR elevato:

$$SNR = (GP_{tx})/P_{noise}$$

Dove G è il guadagno, posso aumentarlo ad esempio con un amplificatore, facendo attenzione a non aumentare l'interferenza. Inoltre, c'è un limite anche per la protezione della salute.

Ci sono tre limiti sul livello di potenza che si può raggiungere: non linearità, interferenza, aspetti regolatori.

Canali che funzionano bene devono avere una probabilità di errore dell'ordine di 10^{-5} (accettabile), 10^{-6} , 10^{-10} (e maggiori buoni).

Capacità del canale

Rappresenta la massima quantità di informazione che si può far passare attraverso il canale, la capacità limite del canale AWGN è:

$$C = 0.5 \log_2(1 + \frac{P_{rx}}{P_n})$$

(se trasferisco due bit/simbolo, non sono pieni perché ci sono errori)

$$\frac{P_{rx}}{P_n} = \text{rapporto segnale rumore}$$

Un canale con rumore additivo e dispersivo può essere ridotto ad un AWGN se designato ad avere ISI nulla; per far sì che ciò abbia fine deve sussistere $F_s = \frac{1}{T} \leq 2W_c$. Allora

$$R_b \leq C_b = W_c \log_2(1 + SNR)$$

Se vale $R_b \leq C_b$ allora è possibile avere comunicazioni affidabili.

"Affidabilità" vuol dire che la frequenza di bit di errore (BER) può essere reso piccolo in modo arbitrario attraverso una codifica complessa.

Se $R_b > C_b$ allora è sicuro che la probabilità di errore non può scendere sotto una certa soglia, quindi una comunicazione affidabile non è possibile.

Capacità di un canale = quantità di bit informativi che possono essere trasferiti attraverso un canale

Per un canale AWGN che crea una corrispondenza ingresso uscita per cui l'output $Y = h_0X + Z$, con

$x \in \{-A, A\}$, ossia l'input più un rumore additivo gaussiano.

Se $y > 0$ allora $x' = A$

Se $y < 0$ allora $x' = -A$

Nell'AWGN Channel Capacity una comunicazione affidabile è possibile se $R_b < C_b$.

Se $R_b > C_b$ allora è sicuro che la probabilità di errore non può scendere sotto una certa soglia, quindi una comunicazione affidabile non è possibile.

"affidabile" significa che BER può essere fatto arbitrariamente piccolo attraverso codici complessi.

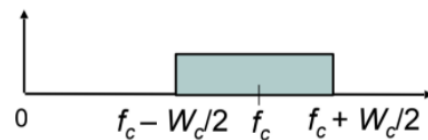
Modems and Digital Modulation

Il bandpass è l'insieme delle frequenze che possono passare attraverso un canale. Se l'uscita è zero dopo aver messo in ingresso una sinusoide, allora quest'ultima non passa nel canale.

La banda base ha lunghezza di banda fino a W_c .

I canali passa-banda

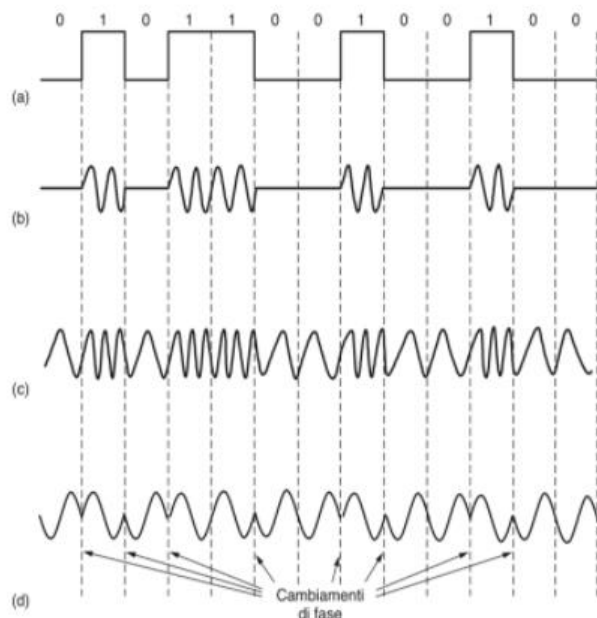
La maggior parte dei canali come la fibra ottica non sono in banda base ma in passa-banda. Quest'ultima non è contigua nell'origine, è centrata intorno a una frequenza f_c con intervallo $[f_c - W_c/2, f_c + W_c/2]$.



L'idea fondamentale per trasmettere un segnale attraverso questo canale è ricondursi al caso precedente, prendo una sinusoide che viene chiamata "portante" (= carrier) e modifico una delle caratteristiche della portante in funzione del segnale che vorrei trasmettere.

Le tre cose che posso modulare della sinusoide sono: frequenza, ampiezza e fase.

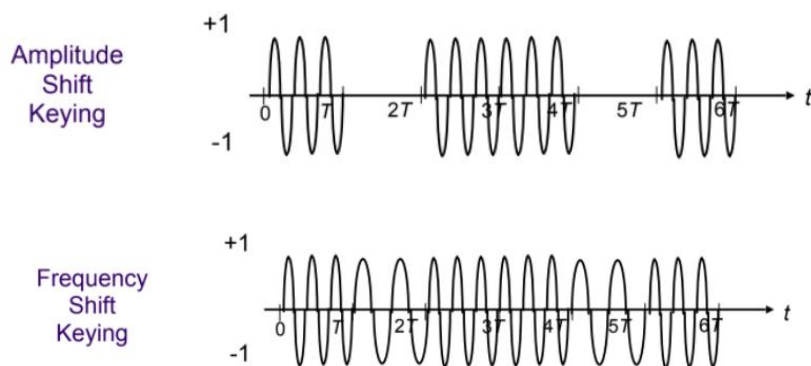
$$c(t) = A \cos(2\pi f_c t + \gamma)$$



- a) Segnale binario
- b) Modulazione di ampiezza (**ASK**)
- c) Modulazione di frequenza (**FSK**)
- d) Modulazione di fase (**PSK**)

In base a cosa modulo si parla di: modulazione di ampiezza, modulazione di fase, modulazione di frequenza.

Modulazione in ampiezza e frequenza



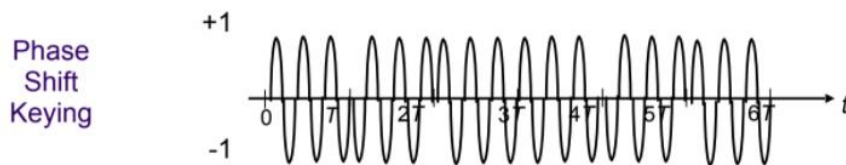
Mapa di bit in ampiezza sinusoidale: "1" invia sinusoide, "0" no sinusoide. Il segnale della sinusoide viene acceso e spento in base alla sequenza di informazioni.

Il demulatore di un sistema ASK ha come compito solo quello di determinare la presenza o l'assenza di una sinusoide di un dato intervallo di tempo.

Mapa di bit in frequenza: se il bit di informazione è "1" la sinusoide ha frequenza $f_c + \gamma$, se invece è "0" la sinusoide ha frequenza $f_c - \gamma$.

Il demulatore per un sistema FSK deve essere in grado di determinare quale delle due possibili frequenze è presente nell'intervallo dato.

La fase di modulazione



La fase della sinusoide viene alterata secondo la sequenza delle informazioni.

- Mappa di bit in sinusoidi della fase:
 - "1" invia $A\cos(2\pi ft)$ cioè la fase 0
 - "0" invia $A\cos(2\pi ft + \pi)$, cioè la fase π

Poiché $\cos(2\pi ft) = \cos(2\pi ft + \pi)$ notiamo che questo schema PSK è equivalente a moltiplicare il segnale sinusoidale per +1 quando l'informazione è 1 e per -1 quando l'informazione è 0.

Per questo il demodulatore di un sistema PSK deve essere in grado di determinare la fase del segnale ricevuto paragonandosi con qualche fase di riferimento.

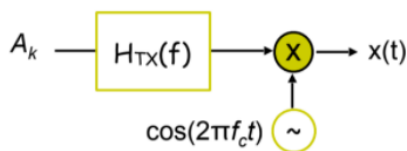
Il modulatore

Il modulatore sposta il segnale da banda base a passa banda, è comunemente chiamato modem.

Come si fa la modulazione? Prendiamo ad esempio un segnale sinusoidale a frequenza f_c (una delle tre caratteristiche che posso modificare, le altre due sono fase e ampiezza) e la modulo tale da renderla funzione del segnale che voglio trasmettere.

Si prende un segnale che si chiama PORTANTE e se ne modula o l'ampiezza o la fase o la frequenza, o anche più di una, in funzione del segnale che voglio trasmettere.

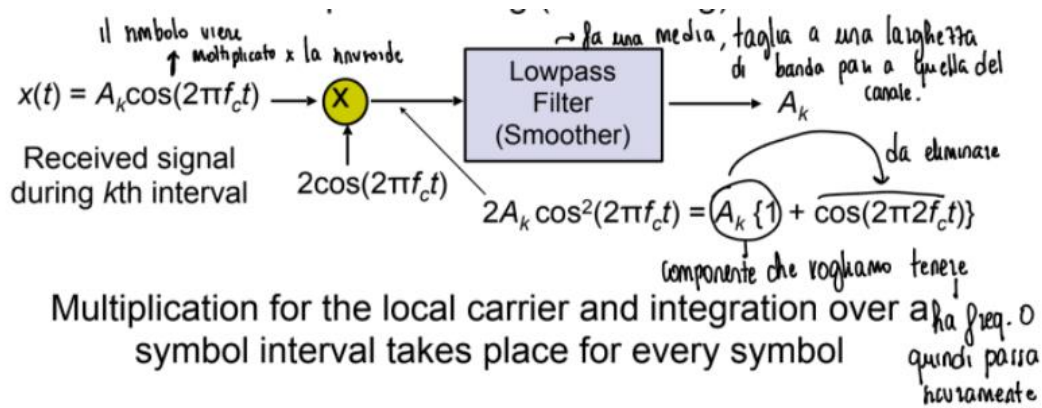
Ad esempio: modulare $\cos(2\pi f_c t)$ moltiplicando per A_k per T secondi:



Demodulazione

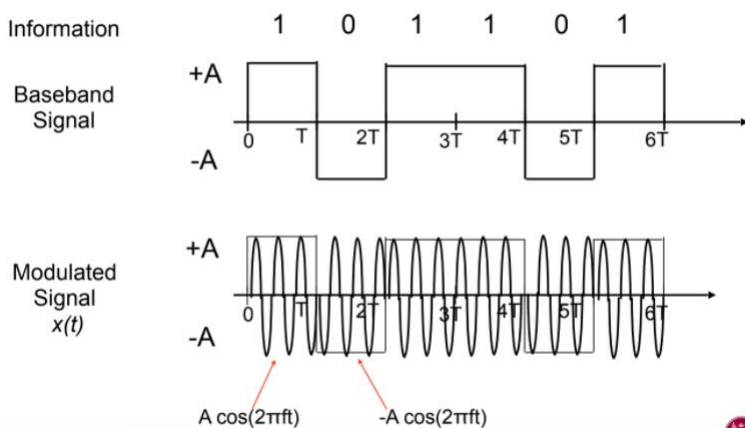
È l'operazione inversa, sposta il segnale da passa banda a banda base.

Si recupera A_k moltiplicando per $\cos(2\pi f_c t)$ per T secondi e usando un filtro passa-basso (che taglia il segnale a una larghezza di banda pari a quella del canale) ritornando alla sequenza binaria originale.



La moltiplicazione per un carrier (vettore) locale e l'integrazione su un intervallo di simbolo si svolge per ogni simbolo.

Esempio di modulazione:



Immaginiamo di voler fare la modulazione in ampiezza. Il binario è 1 se viene trasmesso un coseno con ampiezza A ed è invece 0 se l'ampiezza è $-A$.

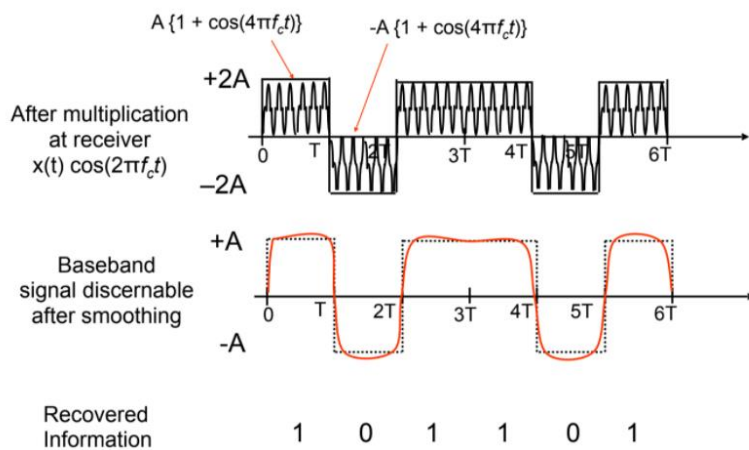
$$+A \cos(2\pi f_c t) \text{ se il bit è } 1$$

$$-A \cos(2\pi f_c t) \text{ se il bit è } 0$$

Ogni T secondi il modulatore accetta un nuovo simbolo di informazione binaria e aggiusta l'ampiezza A_k di conseguenza.

Il segnale modulato non è più una sinusoide pura, in quanto il segnale trasmesso in generale contiene dei glitch (=termine usato per indicare un picco breve ed improvviso (non periodico) in una forma d'onda, causato da un errore non prevedibile, per estensione è usato per indicare un breve difetto del sistema) tra gli intervalli T , ma le sue oscillazioni primarie sono ancora centrate nella frequenza f_c e quindi si trovano nel range di frequenze che passano per il canale passa-banda.

Esempio di demodulazione:



monitorando la polarità del segnale sugli intervalli T , un ricevitore può recuperare la sequenza originale di informazioni.

Moltiplicando il segnale modulato $Y_i(t)$ per $2\cos(2\pi f_c t)$, il segnale risultante è $+2A\cos^2(2\pi f_c t)$ se il simbolo dell'informazione originale è 1, $-2A\cos^2(2\pi f_c t)$ se il simbolo dell'informazione originale è 0.

Con il low pass filter appianiamo l'oscillazione e recuperiamo il segnale

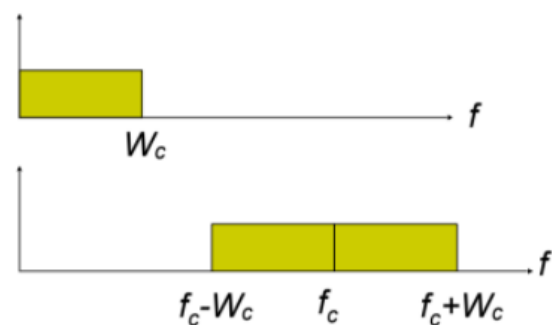
originale e di conseguenza la sequenza binaria.

Velocità di segnalazione e larghezza di banda di trasmissione

- Un fatto della teoria della modulazione:

se il segnale di banda base $x(t)$ ha larghezza di banda $W_c \text{ Hz}$

allora il segnale modulato $x(t) \cos(2\pi f_c t)$ ha larghezza di banda di $2W_c$



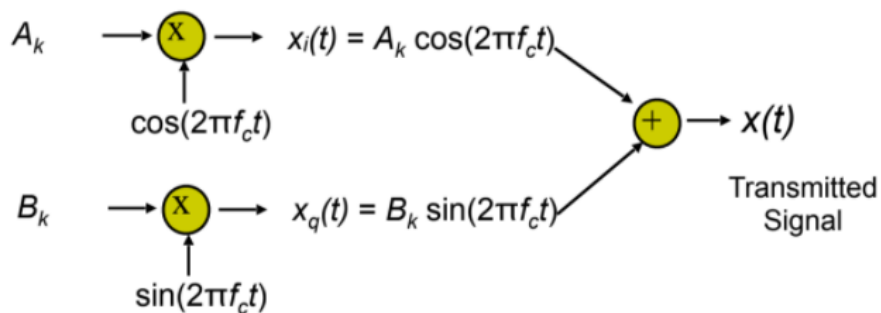
QAM and Signal Constellations

Supponiamo di avere un flusso di informazioni originale che genera simboli alla velocità di $2W$ symbols/second. Nel QAM (quadrature amplitude modulation) dividiamo il flusso originale di informazioni in due sequenze, una dei simboli pari e una dei simboli dispari, che chiamiamo B_k e A_k .

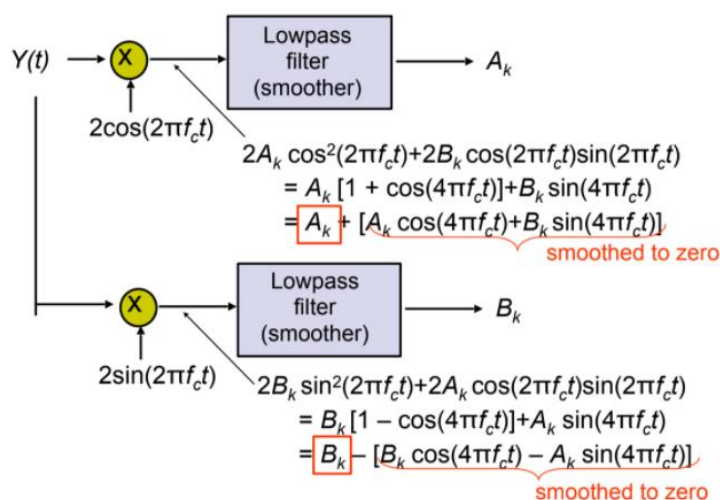
Ognuna di queste sequenze ha una velocità di $2W$ symbols/second.

Supponiamo di prendere la sequenza dispari A_k (componente in fase) e di produrre un segnale modulato moltiplicandola per $\cos(2\pi f_c t)$, si ottiene $x_i(t) = A_k \cos(2\pi f_c t)$. Facciamo la stessa cosa con la sequenza B_k (fase di quadratura), ottenendo un altro segnale modulato moltiplicandola per $\sin(2\pi f_c t)$, ottenendo

$x_q(t) = B_k \sin(2\pi f_c t)$. Entrambi questi segnali si trovano all'interno del canale passa banda. Sommando questi due segnali otteniamo il segnale trasmesso $x(t) = A_k \cos(2\pi f_c t) + B_k \sin(2\pi f_c t)$.



QAM demodulation



Per ritornare al segnale in banda base, bisogna moltiplicare il segnale che arriva (che è la somma della componente in fase + la componente in quadratura) per la portante del ricevitore.

Il risultato di questa moltiplicazione ha due componenti: un termine proporzionale a A_k o B_k e un termine oscillante a frequenza $2f_c$.

Di quest'ultimo termine ce ne si libera facendo passare il segnale attraverso un filtro passa basso. In uscita ho recuperato i termini A_k e B_k , che sono

quelli in banda base.

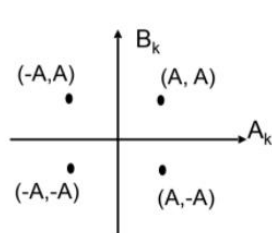
Il prezzo da pagare per mandare due simboli per ogni intervallo di simbolo è raddoppiare l'hardware.

È come aver creato due canali AVGN indipendenti.

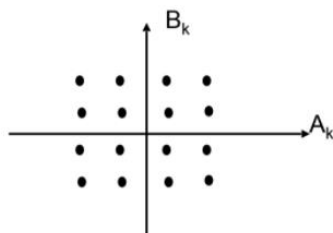
Ogni coppia (A_k, B_k) definisce un punto nel piano.

Questi punti formano l'insieme delle costellazioni nel piano, poiché A_k e B_k variano nel discreto (in quanto possono avere valore $+A$ e $-A$) avremo quattro punti. In un dato intervallo di tempo T , solo uno dei quattro punti in questa costellazione può essere usato.

• Signal constellation set of signaling points



4 possible points per T s
2 bits / pulse

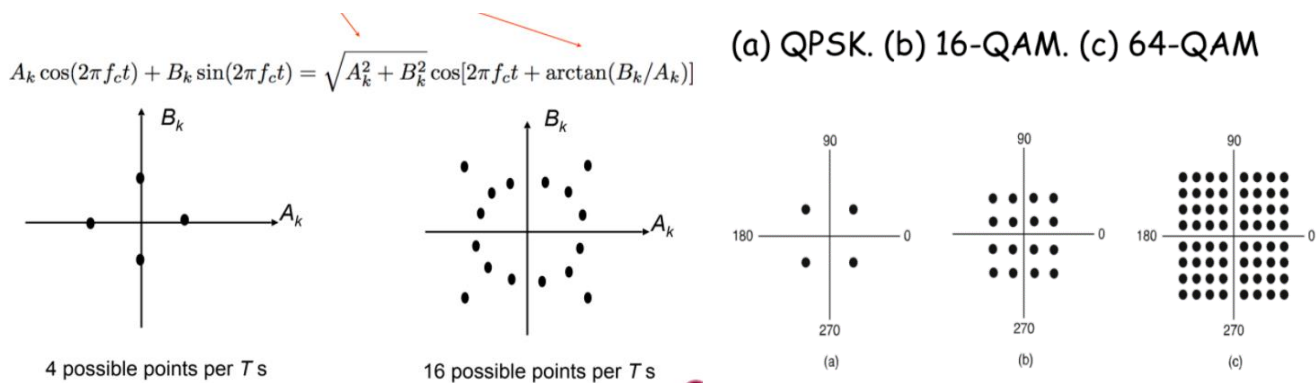


16 possible points per T s
4 bits / pulse

La prima figura è la rappresentazione 4-QAM o anche QPSK (modulazione di fase in quadratura), è un caso particolare di QAM.

È quindi chiaro che in ogni intervallo T stiamo trasmettendo due bits di informazione. Nel caso della segnalazione in banda base, il numero di bits può essere incrementato aumentando il numero di livelli che sono usati. Ad esempio, la costellazione con 16 punti esce fuori quando i termini moltiplicati per le funzioni di seno e coseno possono assumere 4 possibili livelli.

Un altro modo per vedere la QAM, e quindi ottenere costellazioni più fitte, è la modulazione simultanea dell'ampiezza e della fase del segnale carrier (figura a sinistra).

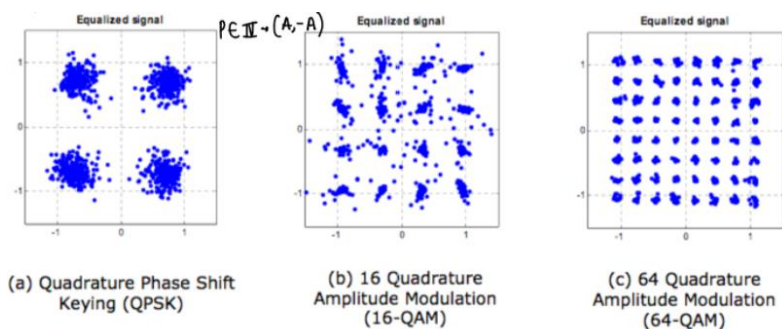


In un dato momento il sistema cerca di utilizzare sempre la costellazione più fitta.

Le cose da tener presenti sono due:

- La potenza trasmessa: è proporzionale all'area coperta dalla costellazione (maggiore è l'area coperta, maggiore è la frequenza che dovrò trasmettere). Voglio un'area più piccola possibile.
- La distanza tra i punti: in ricezione non si ha la posizione esatta del punto, quello che ricevo è il punto più una piccola distanza aleatoria. Voglio punti più distanti possibili così ho meno probabilità di sbagliare a parità di potenza di rumore. Vado a scegliere il punto più vicino a quello che ho ricevuto.

Costellazioni del segnale ed errori



Il ricevitore non vede punti precisi ma nuvole di punti. Quando i punti si discostano parecchio l'uno dall'altro allora sto utilizzando una costellazione robusta (meno probabilità di errore, meno bits). Con una costellazione più fitta invece riesco a trasmettere più bit al secondo.

Di solito si cerca di usare una costellazione più fitta possibile perché trasporta più bit.

Nella 4-QAM ogni simbolo porta 2 bit/s, nella 16-QAM ogni simbolo porta 4 bit/s e nella 64-QAM ogni simbolo porta 6 bit/s.

Tuttavia, utilizzare costellazioni più fitte comporta un rumore maggiore:

- Se l'SNR è basso allora uso una costellazione meno fitta
- Se l'SNR è alto posso usare una costellazione più fitta.

Se il canale è stazionario, SNR non vale non tempo. Quindi prendiamo la costellazione più fitta possibile.

Se invece il canale non è stazionario (come il cellulare), SNR varia nel tempo, il terminale continuamente stima la qualità del canale, stime di SNR. Quando si accorge che l'SNR è alto, ricevitore e trasmettitore decidono di utilizzare una costellazione fitta. Se invece l'SNR è basso, allora prendo una costellazione meno fitta.

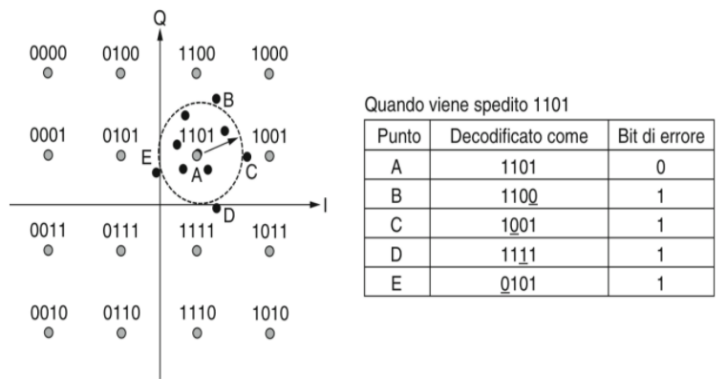
Codifica di gray per QAM-16

Definizione: Un codice binario si dice Gray se le sequenze che lo compongono sono a lunghezza fissa e sono ordinate in modo tale che due configurazioni adiacenti differiscono per un unico bit; questa proprietà è nota come cambio 1.

Con la regola del più vicino scelto il punto più vicino a quello che ho ricevuto.

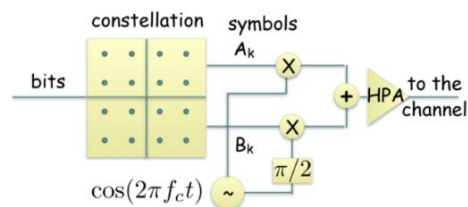
Ai punti della nostra costellazione associamo bit. La codifica di Gray associa, in questo caso gruppi di 4 bit, a ogni punto della costellazione in modo che a punti vicini corrispondano sequenze di bit. L'idea di fondo è che l'errore più probabile che potrebbe avvenire è tra simboli vicini, per questo se si verifica un errore di simbolo, almeno è associato a un solo bit di errore e non di più.

Punti contigui differiscono di un solo bit.



Perciò, grazie alla codifica di Grey, l'errore sul simbolo si traduce quasi sempre in un singolo errore binario.

Il trasmettitore passa-banda

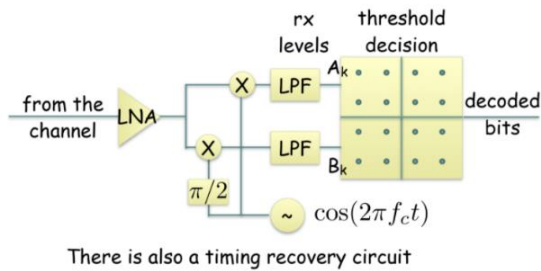


In un trasmettitore passa-banda entrano i bit che vengono in seguito mappati in punti della costellazione nel piano complesso (utilizzando la codifica di gray). Ad ognuno di questi punti corrispondono, in questo caso, 4 bit raggruppati in gruppi da 4. Quindi arrivano i bit, li raggruppo, prendo 4 bit, vedo che individuano un punto, che andrò a trasmettere.

Prendo la parte reale A_k e la parte immaginaria B_k di quel punto, costruisco un segnale in banda base che porta questi livelli, lo moltiplico per la portante in fase e la portante in quadratura, sommo il risultato e amplifico (HPA= amplificatore) fino al livello di potenza desiderato.

I bit sono raggruppati a gruppi di $\log_2 M$ dove M sono i punti della costellazione.

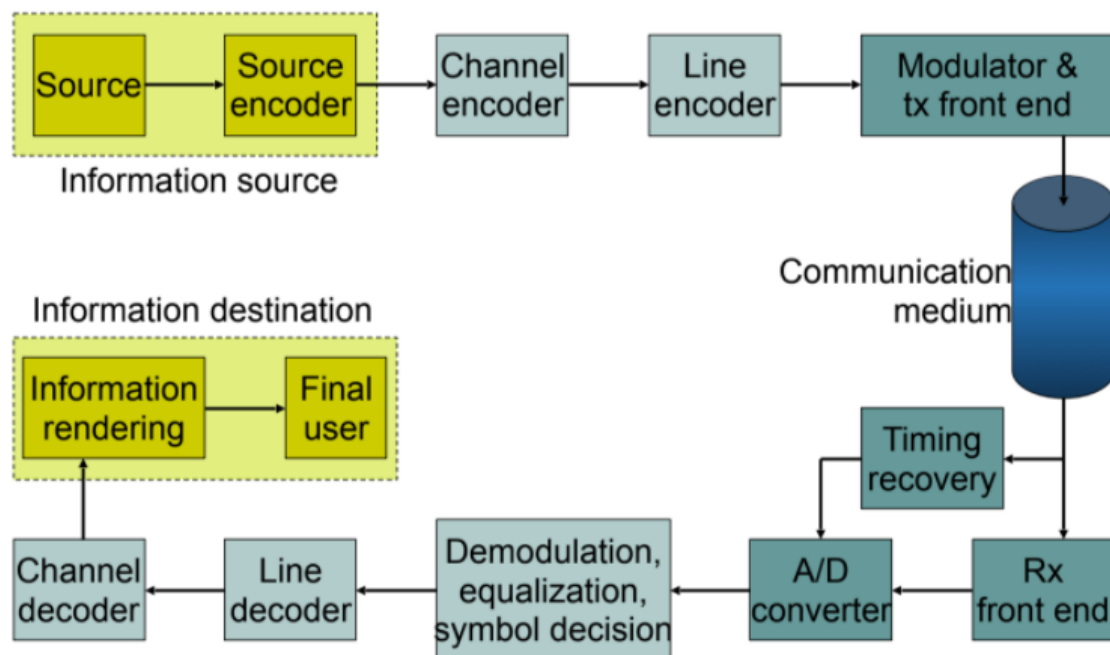
Il ricevitore passa-banda



Nel ricevitore arriva il segnale attenuato, prima di tutto quindi lo amplifico con un LNA (amplificatore ottimizzato a basso rumore). Il segnale viene poi demodulato, cioè moltiplicato per la portante di fase e la portante in quadratura e filtrato attraverso un filtro equalizzatore (LPF) per eliminare l'ISI.

A questo punto ho ricostruito la sequenza degli impulsi in fase e in quadratura e uso questi impulsi come coordinate di un punto (gli A_k e B_k in figura sono valori ricostruiti e non quelli originali). Il decisore poi sceglie il punto più vicino a quello ricevuto, legge la tabellina di codifica e individua i bit che sono stati trasmessi.

Communication system block scheme



LE PROPRIETA' DEI MEZZI E DEI SISTEMI DI TRASMISSIONE DIGITALE

I mezzi wireless e cablati

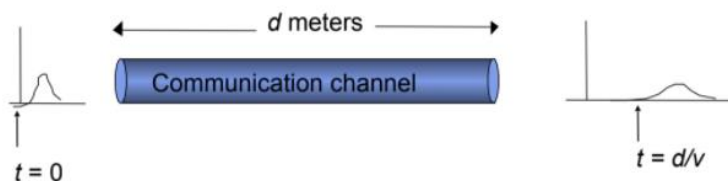
Mezzo di comunicazione wireless

- L'energia del segnale si propaga nello spazio, con limitata direzionalità. È un unico spettro radio non ripetibile.
- È possibile che ci sia interferenza tra spettri, per questo ci sono dei regolatori
- Lunghezza di banda limitata
- Infrastruttura semplice: servono pochi dispositivi per connettere l'utente alla rete (come antenne e trasmettitori)
- Il terminale dell'utente si può spostare, sia alla fine che durante la connessione (ad esempio la radio della macchina).

Mezzo di comunicazione cablato

- È presente un mezzo fisico che rinchioda il campo elettromagnetico, quindi l'energia del segnale è contenuta e guidata dentro un mezzo.
- Lo spettro a differenza del wireless può essere replicato e quindi riutilizzato in mezzi di comunicazione separati (fili e cavi).
- Non c'è limite di capacità nelle reti cablate, basterebbe aumentare semplicemente il numero di mezzi fisici (come, ad esempio, le fibre ottiche).
- L'infrastruttura è molto costosa e complessa.

I problemi fondamentali nei mezzi di trasmissione



Velocità di propagazione del segnale:

- $c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$ nel vuoto
- $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$ velocità della luce in un mezzo dove $\epsilon > 1$ è la costante dielettrica nel mezzo
- $v = 2.3 \times 10^8 \frac{m}{s}$ nei fili di rame; $v = 2.0 \times 10^8 \frac{m}{s}$ in fibra ottica

Legame tra frequenza, velocità e lunghezza d'onda: $f\lambda = v = \frac{c}{n}$

Attenuazione

Un segnale propagandosi in parte perde la sua energia, l'effetto macroscopico è che la potenza che giunge a destinazione è solo una frazione di quella che è stata trasmessa → attenuazione.

L'attenuazione varia con il mezzo e aumenta con la distanza:

$$A = \frac{P_{tx}}{P_{rx}}$$

Se espressa in dB $A(d)[dB] = 10 \log_{10} \left[\frac{P_{tx}}{P_{rx}(d)} \right]$

- Per i mezzi cablati l'attenuazione cresce esponenzialmente al crescere della distanza, è lineare con la distanza e dipende da:
 - La potenza ricevuta a d metri che è proporzionale a $10^{-\left(\frac{\alpha d}{10}\right)}$
 - L'attenuazione in dB = αd dove α è dB/metro.
- Per i mezzi di comunicazione wireless l'attenuazione cresce logicamente con la distanza, ha una dipendenza bassa dalla potenza:
 - La potenza ricevuta a d metri è proporzionale a d^{-e}
 - L'attenuazione in dB = $10e \log_{10} d$, dove e è l'esponente del pathloss; e= 2 nello spazio aperto.

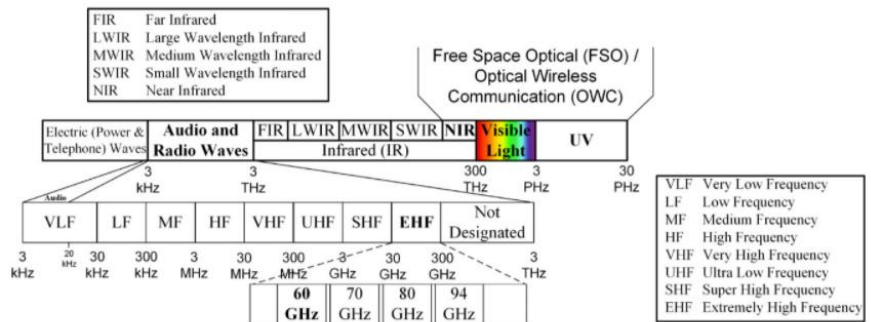
(pathloss = is the reduction in power density (attenuation) of an electromagnetic wave as it propagates through space.)

L'assegnazione dello spettro

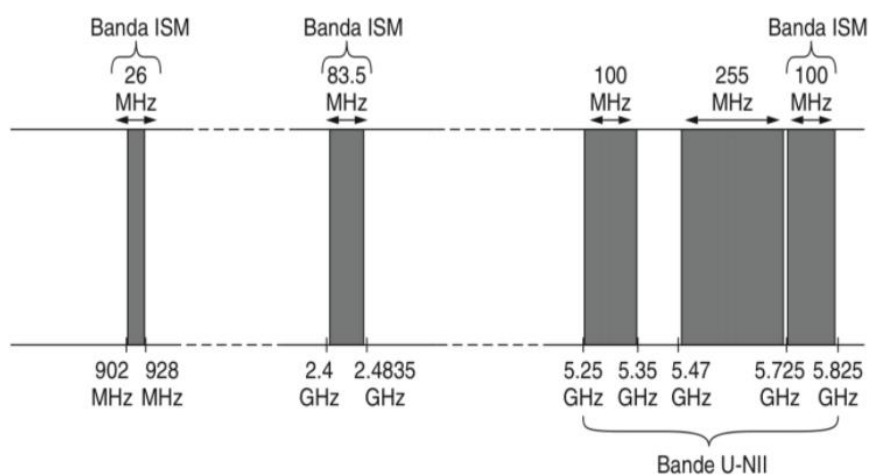
Lo spettro radio è unico. Esso è formato da tutte le possibili frequenze.

La propagazione radio (wireless) avviene propagando un campo elettromagnetico nel vuoto. Più alta è la frequenza, maggiore è l'attenuazione ed è più difficile superare ostacoli come mura.

Una volta che associo uno spettro ad un servizio, non ce ne possono essere altri, viene riservato alle persone che lo utilizzano (la banda è qualcosa che si acquista).



Bande ISM e U-NII utilizzate dai dispositivi wireless negli USA



Ci sono alcuni intervalli di frequenza liberalizzati non soggetti a licenza dove chiunque può usare un trasmettitore.

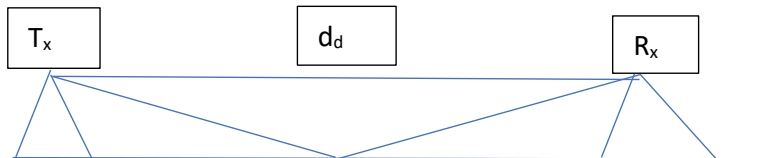
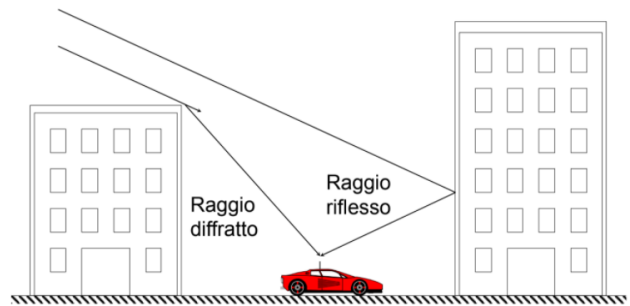
Effetti della propagazione

- Le caratteristiche di propagazione del canale radio sono funzione
 - Della banda di frequenza nella quale si opera
 - Dell'ambiente di propagazione ("indoor" o "outdoor"; extra-urbano, con visibilità o meno del percorso diretto, pianeggiante o collinare; sub-urbano, urbano).
- Fenomeni che caratterizzano la risposta impulsiva $H(f)$ del canale radio
 - Attenuazione: dovuta alla distanza d , che varia con legge del tipo $d^{-\alpha}$, con α compreso tra 2 e 5.
 - Riflessione
 - Diffrazione
 - Rifrazione

Multipath (outdoor)

La prima conseguenza degli ostacoli è il multipath, ossia ci sono più percorsi. Un effetto di questo è che le componenti che arrivano sono sfasate.

I cammini possono sommarsi o attenuarsi a vicenda.



$$x(t) = \cos(2\pi f_o t) \rightarrow A_d \cos(2\pi f_o(t - t_d)) = A_d \cos(2\pi f_o t - 2\pi f_o t_d) = y_d(t) \text{ (output di diffrazione)}$$

$$A_r \cos(2\pi f_o t - 2\pi f_o t_d) = y_r(t) \text{ (output di diffrazione)}$$

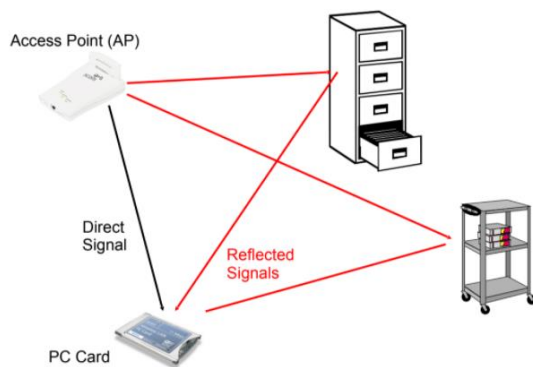
$$x(t) \rightarrow \blacksquare \rightarrow y(t) = y_d(t) + y_r(t)$$

Mi arrivano due coseni sfasati, a noi interessa sapere se questa differenza di fase è prossima a π o 0.

$$\Delta\varphi = 2\pi f_o(t_d - t_r) = 2\pi \frac{c}{\lambda_o} \left(\frac{d_d}{c} - \frac{d_r}{c} \right) = \frac{2\pi(d_d - d_r)}{\lambda_o}$$

La differenza di fase dipende dalla lunghezza d'onda λ_o per questo motivo spostarci potrebbe cambiare il segnale.

Multipath (indoor)



In ambiente chiuso i cammini multipli sono molti di più.

Attenuazione del canale radio

- **Distanza** → attenuazione deterministica: legge della potenza $d^{-\alpha}$
- **Ostacoli** → shadowing (ombreggiamento). A parità di distanza conta anche se ci sono ostacoli, in quel caso non si ha un cammino diretto.
- **Multipath** → **fading**: una forma di distorsione di un segnale che giunge a destinazione sotto forma di un certo numero di repliche, sfasate nel tempo, originate dai vari percorsi (multipath) che il segnale stesso può aver eseguito durante la sua propagazione e sommatasi. Ogni replica inoltre, avendo compiuto un percorso proprio di una certa lunghezza caratterizzato da una riflessione su superfici generalmente diverse, sarà dunque soggetta ad un'attenuazione diversa da quella delle altre repliche. Per sfasamento si intende ritardo ed è importante capire la

differenza di ritardi. Tale sfasamento può essere tale che il percorso diretto e i percorsi riflessi si sommano, oppure si compongono in opposizione di fase e tendono così ad annullarsi.

Ossia quando sommo

$$y(t) = y_d(t) + y_r(t) = A_d \cos(2\pi f_o t - 2\pi f_o t_d) + A_r \cos(2\pi f_o t - 2\pi f_o t_r)$$

$$\text{se } \Delta d \geq \frac{\lambda}{2} \rightarrow \text{si annullano}$$

$$\text{se } \Delta d = 0 \rightarrow \text{si sommano}$$

Lo sfasamento per un canale a frequenza f_c è

$$-2\pi f_c \tau \rightarrow -\frac{2\pi c \tau}{\lambda} \text{ con frequenza portante } f_c = \frac{c}{\lambda}$$

Lo sfasamento alla fine dipende da λ (è dell'ordine di λ), ovvero le distanze sulle quali si vede una variazione importante della fase (da una situazione di fase a una in opposizione di fase) sono dell'ordine di λ .

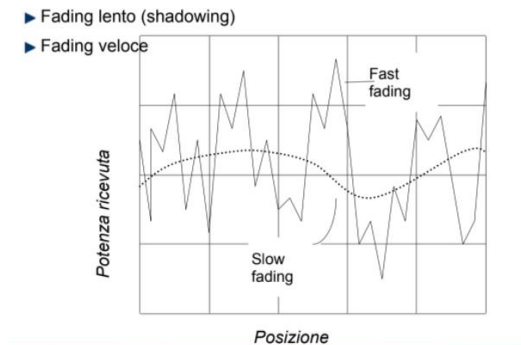
Si sommano tre tipi di attenuazione, cosa succede se ci si sposta? Cambia la distanza, quindi l'attenuazione e gli ostacoli (quindi cambiano anche shadowing e fading)

Affinché:

Lo shadowing cambi $\rightarrow \Delta_{dshadowing} \sim 50m$ (di solito almeno 10 s per notare cambiamenti)

Il fading cambi $\rightarrow \Delta_{fading} = \frac{\lambda_0}{2} \sim cm$ (di solito 5 ms)

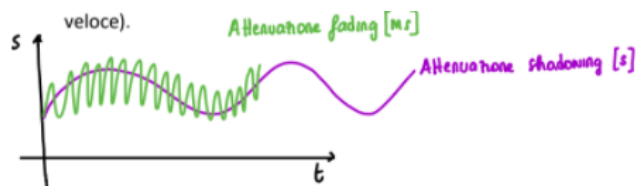
Dallo spazio al tempo



Per un utente radiomobile la variabilità spaziale della potenza ricevuta diventa una variabilità temporale, perché l'utente cambia posizione nel tempo.

Fading lento \rightarrow evidenzia l'effetto dello shadowing.

Fading veloce \rightarrow è dovuto al multipath.



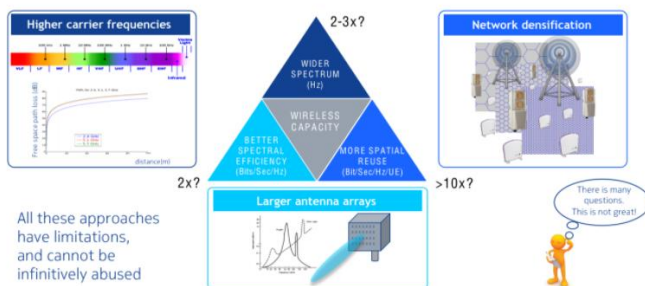
L'espansione della capacità cellulare

Per una rete cellulare il punto fondamentale è capire qual è la capacità della rete, si intende quanti utenti la rete è in grado di sostenere. Un operatore cellulare generalmente ha una banda assegnata che può partizionare. Per servire milioni di utenti si sfrutta l'attenuazione.

Un canale frequenziale si può riutilizzare in punti diversi dello spazio e più volte, tutto dipende dal limitare l'interferenza reciproca, cioè dallo stare a sufficiente distanza in relazione alla potenza che si usa in maniera tale da non disturbarsi.

Per aumentare la capacità:

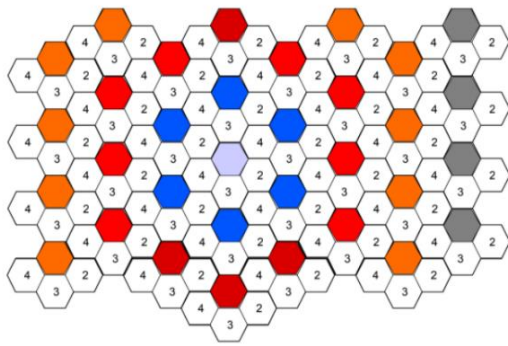
- 1) Aumentare la banda del servizio
- 2) aumentando la capacità del canale giocando sulle costellazioni (più fitte).



Wireless Capacity Gains 1950-2000

- migliorando l'efficienza spettrale (codifica MIMO e metodi di modulazione)
- usando più spettro
- usando piccole celle

rete cellulare → "a celle"



Ad ogni cella (esagono) corrisponde alla zona coperta da una stazione base. Una stazione base emette un segnale che viene ricevuto sempre più attenuato man mano che ci si allontana, per questo vado ad inserire tante stazione base secondo una griglia regolare, così che quando ci si muove abbiamo sempre segnale. Ad ogni stazione base attribuisco dei canali.

Con questa suddivisione in figura, per coprire un'area grande ho usato solamente 4 canali.

Un fattore limitante di tali tecniche e tali sistemi è la presenza di interferenza tra celle adiacenti cui abitualmente si ovvia con la suddivisione del territorio in gruppi di celle o *cluster* i quali si spartiscono la banda radio dedicata in modo tale che celle adiacenti non trasmettano con la stessa frequenza portante.

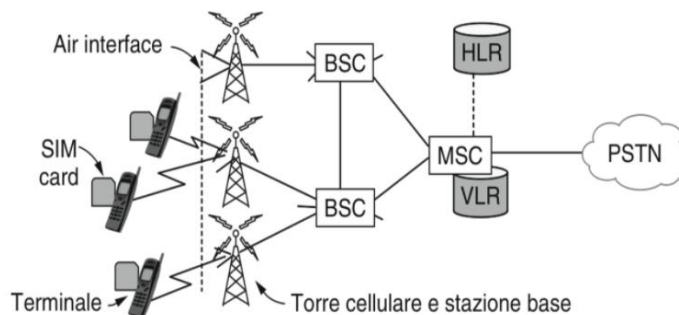
A differenza però dei sistemi radio classici limitati dal rumore, al quale è possibile ovviare con l'aumento della potenza in trasmissione, ovvero agendo sul rapporto segnale/rumore, nonostante gli accorgimenti presi, i sistemi cellulari rimangono comunque dei sistemi limitati dall'interferenza residua tra celle, che dipende tanto dalla mutua relazione tra le frequenze usate dalle varie celle quanto dalla rispettiva potenza utilizzata in trasmissione.

Architettura di rete GSM

Una rete GSM è composta di numerose entità funzionali che possono essere raggruppate in quattro sottosistemi:

- La **Stazione Mobile** (Mobile Station) è il terminale mobile usato dall'abbonato.
- La **Stazione Base** (*Base Station Subsystem*) controlla la trasmissione radio con il terminale.
- Il **Sottosistema di rete** (Network Subsystem), la cui parte principale è il **Centro di Commutazione** (Mobile services Switching Center) realizza la connessione tra l'utente della rete mobile e gli utenti delle altre reti, fisse o mobili.
- Il **Sottosistema di esercizio e manutenzione** (Operation and Support Subsystem) sovrintende al corretto funzionamento e settaggio della rete.

La comunicazione tra le diverse entità del sistema GSM è assicurata da specifiche **interfacce**. La possibilità di effettuare il *roaming*, cioè di potersi spostare liberamente sul territorio servito dal proprio gestore, ed anche su quello servito dagli altri gestori delle nazioni che aderiscono al GSM, richiede di memorizzare in un database la posizione degli utenti ed aggiornarla man mano che questi si spostano. A tal scopo l'area geografica di servizio del sistema GSM è suddivisa gerarchicamente in diverse aree, dette **Network service areas**. Un operatore GSM è quindi sempre in grado di conoscere la posizione di ciascun suo abbonato



Base Station Controller (BSC)

- La stazione base di controllo (BSC) governa il funzionamento di uno o più Stazioni Radio Base (SRB), gestisce il settaggio dei canali radio (instaurazione e rilascio delle connessioni), il *frequency-hopping*, gli *handover* interni e altro ancora. Fornisce la connessione tra una unità mobile (MS) e il centro di commutazione (MSC). In una grande area urbana ci sono un

gran numero di SRB controllate da una o poche BSC.

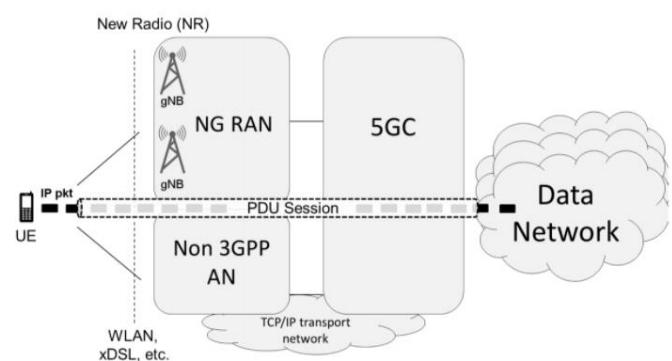
L'HLR (registro utenti abbonati alla rete) costituisce il database su cui un gestore di rete GSM memorizza, in modo permanente, i dati relativi agli utenti che hanno sottoscritto un abbonamento presso di lui.

Il registro VLR (registro visitatori della rete) contiene e mantiene aggiornate le informazioni relative alle MS che sono presenti, temporaneamente, nell'area da esso servita. Informazioni selezionate dal registro HLR e necessarie per il controllo delle chiamate e la gestione dei servizi supplementari.

5G high-level architecture

La tecnologia 5G si pone come obiettivo ottenere una maggiore efficienza e versatilità nel supporto delle applicazioni di rete tramite:

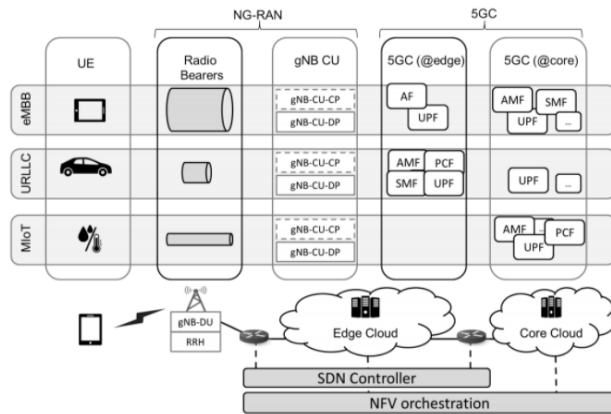
- l'ottimizzazione dell'uso delle risorse di rete mediante la definizione di sottoreti virtuali indipendenti per ogni tipologia del servizio (*slicing*)
- la virtualizzazione di gran parte dei dispositivi di rete e una gestione dinamica della banda disponibile tramite sistemi automatizzati di tipo SDN
- la capacità di gestire una maggiore quantità di dispositivi per unità di superficie (circa 1 000 000 di dispositivi per km² contro i 1 000-100 000 per km² della 4G)
- il supporto di caratteristiche più spinte in termini di latenza per garantire tempi di risposta in "tempo reale", necessari per applicazioni critiche
- una maggiore velocità di trasmissione dei dati, teoricamente fino a 10 gigabit al secondo (Gbit/s)
- una significativa riduzione del consumo energetico (90% in meno rispetto alla 4G per ogni bit trasmesso).



Network slicing 5G

Lo slicing di rete 5G è un'architettura di rete che consente il multiplexing di reti logiche virtualizzate e indipendenti sulla stessa infrastruttura di rete fisica. Ogni fetta di rete è una rete end-to-end isolata, adattata per soddisfare i diversi requisiti richiesti da una particolare applicazione.

Per questo motivo, questa tecnologia assume un ruolo centrale per supportare le reti mobili 5G progettate per abbracciare in modo efficiente una pletera di servizi con requisiti di livello di servizio molto diversi



(Ognuno di questi vertical ha delle caratteristiche specifiche, tuttavia la rete è una sola, è composta da diverse “fette” al servizio di diverse applicazioni).

La parola chiave è condivisione perché crea economie di scala.

M2M communications

Quella che abilita le connessione machine to machine non è una **tecnologia M2M** in particolare, ma l'insieme di tutte le tecnologie che consentono una **raccolta di dati** e il loro scambio automatizzato tra macchine, senza che sia necessario l'intervento dell'uomo come “mediatore”. Per capire **cosa significa M2M** c'è da aggiungere che la **trasmissione dei dati** può essere finalizzata al miglioramento e alla razionalizzazione dei processi, grazie a un insieme di soluzioni e sistemi integrati che consentono l'analisi dei dati tra le apparecchiature connesse direttamente l'una all'altra o tramite un network. Si tratta quindi dell'insieme di algoritmi e procedure grazie ai quali i sistemi integrati di possono svolgere dei compiti autonomamente grazie al **trasferimento di informazioni da macchina a macchina** e all'analisi dei dati che provengono da un altro dispositivo, senza che ad abilitare l'**utilizzo dell'informazione** ci siano **interazioni umane**.

La caratteristica principale del machine to machine è quella di creare una rete di collegamento tra macchine diverse: le informazioni vengono raccolte tramite sensori, e poi vengono scambiate, quindi inviate e ricevute, attraverso una rete, che può anche servirsi di un server per raccogliere e stoccare il flusso di dati. Per questo procedimento, completamente digitalizzato, non è importante a che distanza siano effettivamente, purché i **dispositivi siano connessi a Internet** per dare vita a una vera e propria **comunicazione tra macchinari**, anche all'interno di un **sistema chiuso**. Ovviamente più è importante che i dati vengano cambiati in tempo reale e più sarà fondamentale utilizzare un'infrastruttura di comunicazione ad alte prestazioni, come la fibra ottica o in prospettiva il nuovo standard mobile 5G.

Per fare in modo che in macchinari possano entrare in comunicazione i sistemi M2M utilizzano nella maggior parte dei casi reti **wireless**, che possono essere sia pubbliche sia private, e possono arrivare nei casi più complessi a integrare diverse reti a seconda delle esigenze e delle possibilità, sempre all'interno di un sistema chiuso: fibra, rete fissa e reti cellulari o satellitari, a seconda delle scelte di **asset management**.