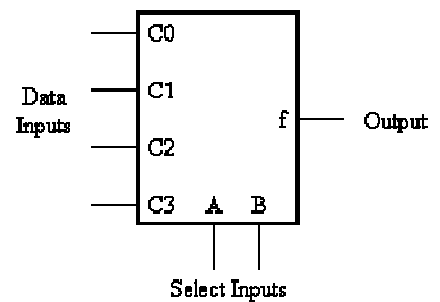


Nelle [telecomunicazioni](#), in [elettronica](#) e [reti di computer](#), la **multiplazione**, o in [inglese](#) **multiplexing**, è il meccanismo o tecnica per cui più canali trasmissivi in ingresso condividono la stessa [capacità trasmissiva](#) disponibile in uscita, combinando più [segnali analogici](#) o flussi di [dati digitali](#) (detti segnali *tributari*) in un solo segnale (detto *multiplo*) [trasmesso](#) in uscita sullo stesso collegamento fisico. Il dispositivo elettronico preposto alla multiplazione è detto [multiplexer](#).



DUE TECNICHE FONDAMENTALI DI MULTIPLAZIONE

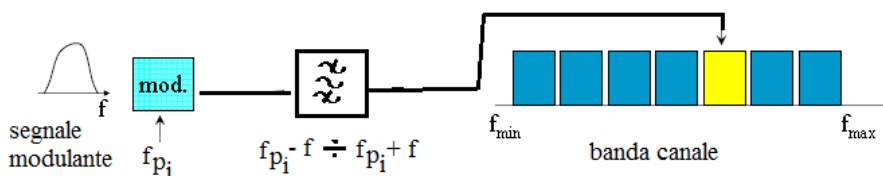
- Multiplazione a divisione di frequenza (FDM)
- Multiplazione a divisione di tempo (TDM)

FDM (Frequency Division Multiplexing: Multiplazione a divisione di frequenza)

Questa tecnica prevede di trasmettere più segnali su un solo canale in modo che la banda totale disponibile B venga divisa in un certo numero (n) di intervalli di sottobande chiamati canali o tributari (b_c). Ogni utente (canale) utilizzava la propria banda per trasmettere dati, immagini e voce. Normalmente, i canali vengono separati da una banda di guardia (b_g) per evitare che ci siano interferenza fra essi.

Ogni comunicazione usa una banda di frequenze diversa, attraverso una modulazione (SSB);

Con la modulazione si ottiene un segnale ad alta frequenza che contiene l'informazione originaria, occupa una banda diversa e, soprattutto, è collocato in posizione diversa sull'asse delle frequenze.

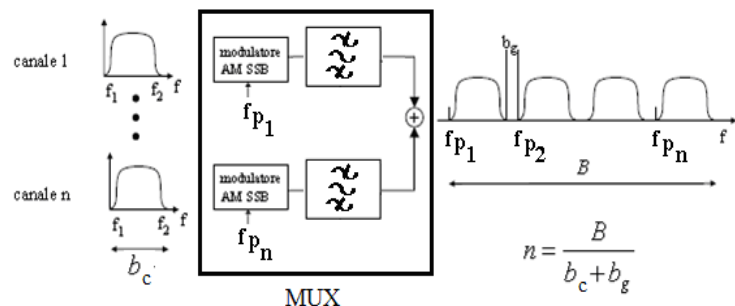


Nel caso di n canali (segnali) da trasmettere, si utilizza un multiplexer analogico (AMUX) che, trasforma la trasmissione in parallelo in una seriale, trasmettendo su un solo canale un insieme di segnali presenti in ingresso.

$B =$ banda complessiva utilizzabile del mezzo trasmissivo

$b_c =$ banda del segnale

$b_g =$ banda di guardia



In passato l'FDM veniva usato come tecnica di multiplazione dei canali vocali tra centrali telefoniche banda segnale vocale: circa 4 kHz. multiplazione di 12 canali da 4 kHz su una banda di 48 kHz (compresa fra 60 e 108 kHz).

Multiplazione a Divisione di Tempo TDM (Time Division Multiplexing)

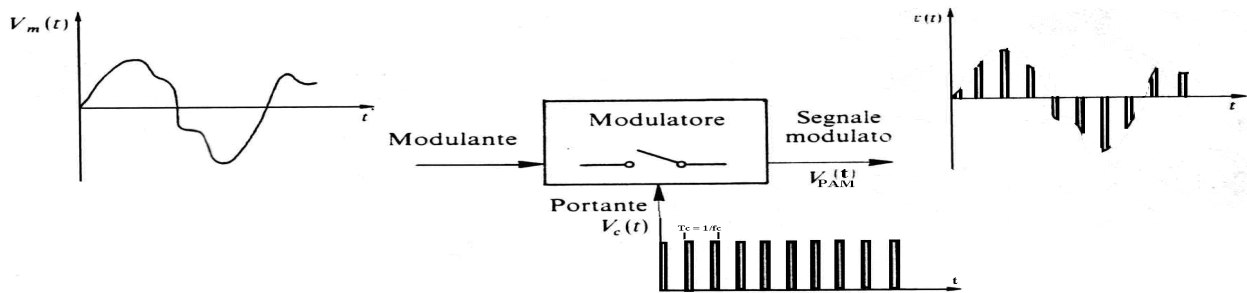
Al contrario della tecnica FDM, in cui N segnali possono essere trasmessi su un unico supporto fisico a patto che essi siano collocati in N bande di frequenza diverse e disgiunte. Invece, nella tecnica **TDM (Time Division Multiplexing)** gli N segnali occupano la stessa banda, ma per la loro trasmissione simultanea, occorre impiegare diversi intervalli di tempo.

In questa tecnica il tempo di funzionamento è suddiviso in tempi fissi e ripetitivi ciclicamente, chiamati time-slot (tempo del *canale*). Durante un intervallo, trasmette un solo utente, il quale ha a disposizione tutta la banda disponibile; una volta esaurito l'intervallo di tempo a sua disposizione, tale utente smette di trasmettere o ricevere e subentra l'utente successivo. Il segnale ottenuto mediante la multiplazione è definito segnale *multicanale* o semplicemente *multiplo*. Il dispositivo utilizzato è il multiplexer (MUX).

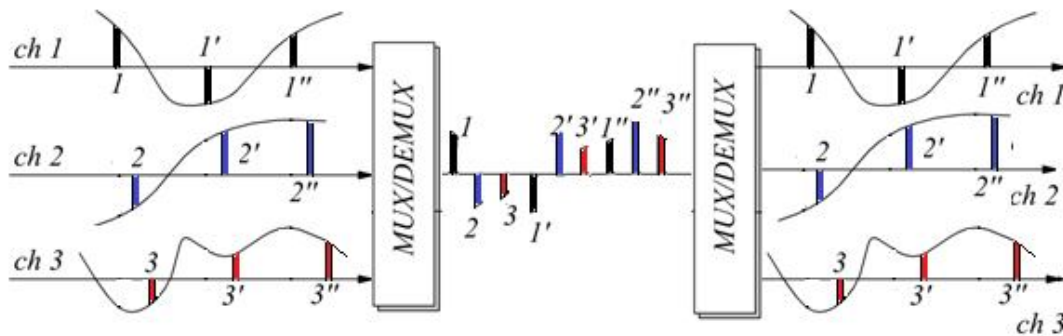
Esistono due tipi di multiplazione:

- Multiplazione analogica (TDM-PAM): è tecnica applicata nel passato ai segnali telefonici. Essa si basa su segnali campionati di tipo PAM (Pulse Amplitude Modulation), modulazione di ampiezza a portante impulsiva. Il teorema

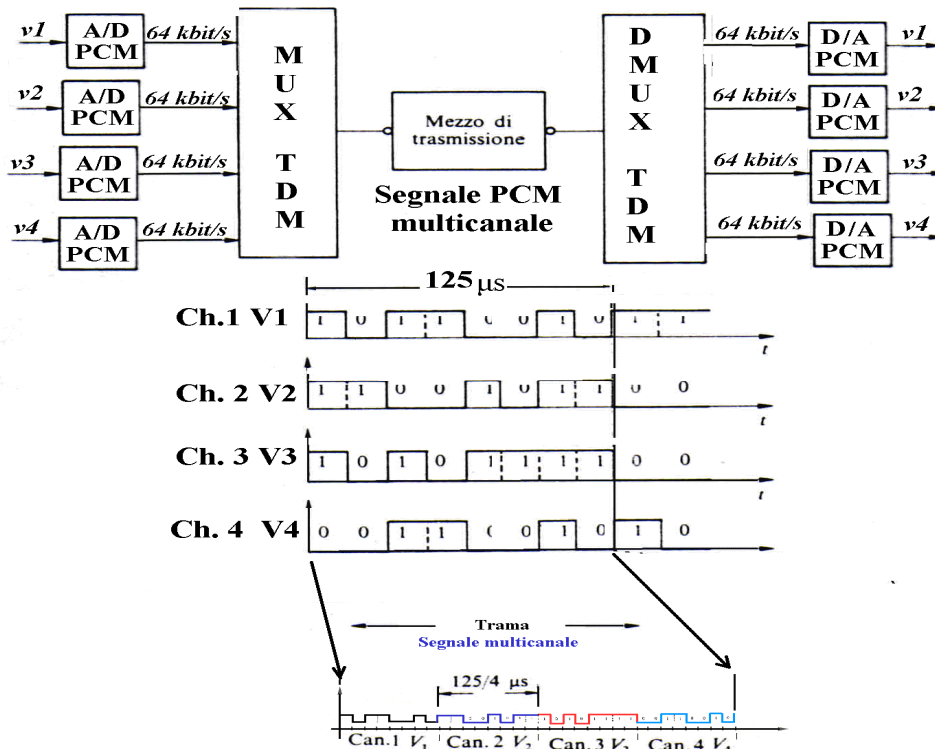
di campionamento di Shannon-Nyquist rende possibile tale modulazione e il segnale modulato presenta impulsi la cui ampiezza varia, in modo proporzionale al valore dei campioni del segnale modulante. Per trasmettere relativi ad altri canali, si utilizza l'intervallo di tempo presente tra due impulsi successivi del segnale PAM. Evidentemente, la durata di ciascun impulso (τ) degli N canali non può superare il valore di T_c/N (T_c : periodo di campionamento). La larghezza di banda richiesto al canale trasmissivo deve essere pari a: $B = N \cdot f_{max}$ (f_{max} : è la frequenza massima dei segnali analogici).



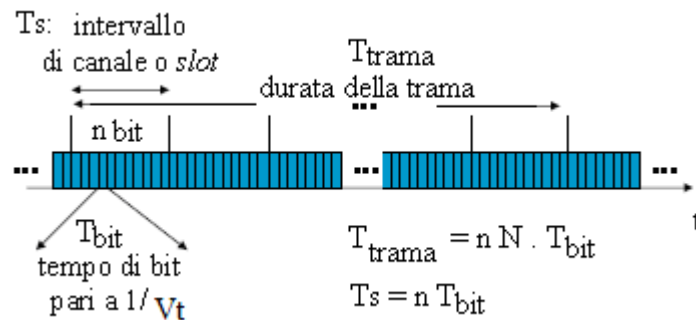
La portante corrisponde al segnale di campionamento con un periodo è quello di Shannon-Nyquist $T_c = 1/f_s$



- Multiplazione digitale (TDM-PCM) è la tecnica attualmente più diffusa e consiste di aggregare N flussi numerici (slot o canale) in una trama multicanale. In questo caso i segnali degli N canali di ingresso, dopo essere stati campionati sequenzialmente ad intervalli regolari, vengono codificati in forma digitale ad n bit e convertiti in gruppi di impulsi per essere infine convogliati in un unico segnale PCM multicanale. In figura è illustrato un sistema di trasmissione TDM-PCM a 4 canali con i relativi segnali digitali e il segnale PCM multicanale risultante.



In un canale numerico a velocità V_t (bit/s), costituito da N canali (slot) che a loro volta contengono un insieme di n bit. La durata trasmissione di ogni bit è data da: $T_{bit} = 1/V_t$



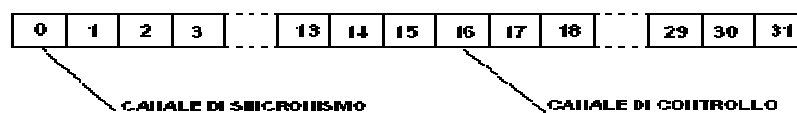
La velocità di emissione di un codificatore PCM è $V_e = f_c [\text{campione/s}] \cdot n [\text{bit/campione}]$.

La TRAMA del PCM

Lo standard CCITT (Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique) definisce che, il **PCM europeo** che si applica ai canali telefonici consente di far transitare su un solo cavo 32 canali numerici (**tributari**), di cui, 30 sono canali vocali e 2 sono canali (0 e 16) di servizio (sincronismo e di controllo della bontà di trasmissione). Il tempo totale della trama è : $T_{\text{trama}}=125\mu\text{s}$ e ogni canale formato di 8 bit.

Con moltiplicazioni successive si possono concentrare canali tributari di ordine superiore ottenendo segnali numerici relativi a 480, 1920 e anche 7680 canali.

TRAMA DEL PCM



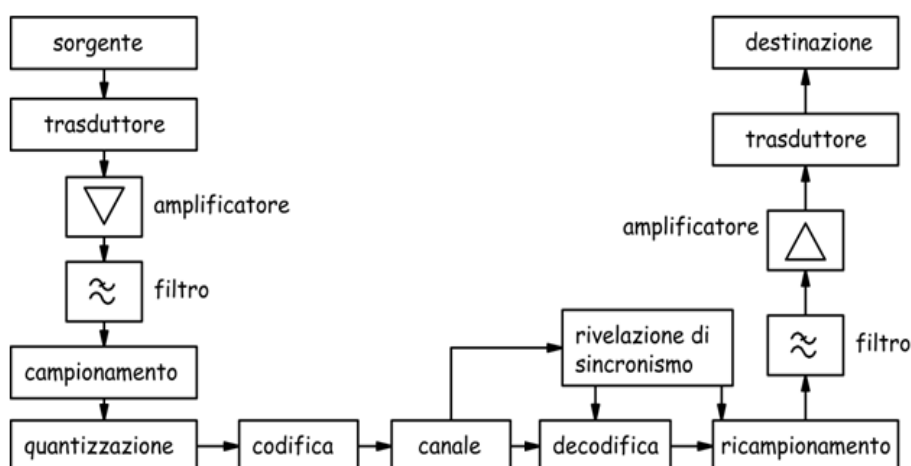
I numerosi vantaggi offerti dall'impiego del sistema di comunicazione TDM-PCM invece di quello analogico in banda base TDM-PAM o di quello [FDM](#) si possono riassumere nei seguenti punti:

- Basso costo degli apparati.
- Buona qualità della trasmissione.
- Massimo sfruttamento dei mezzi trasmissivi.
- Semplicità di manutenzione.
- Uso di mezzi trasmissivi moderni (fibre ottiche).

LA TECNICA PCM

I sistemi per segnali numerici, impiegano una sola tecnica di modulazione, derivata dalla PAM, che prende il nome di modulazione di impulsi codificati.

Lo schema a blocchi di un sistema ad un solo canale di codificatore/decodificatore PCM



La trasformazione di un segnale analogico in un segnale digitale non può prescindere dai seguenti processi:

- [Campionamento](#).
- [Quantizzazione](#).
- [Codifica](#).

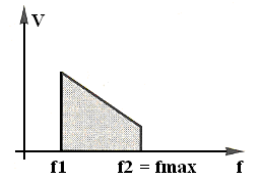
CAMPIONAMENTO

In base al teorema di **Shannon-Nyquist**, un segnale a banda limitata compresa tra le frequenze f_1 e f_2 ($f_2 > f_1$) può essere rappresentato mediante una successione di campioni prelevati con una frequenza f_c detta di campionamento, pari almeno a $2f_2$.

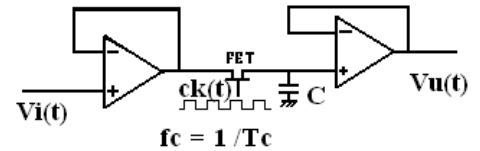
$$f_c \geq 2 \cdot f_2$$

per ragione di maggiore affidabilità, generalmente si preferisce adottare il criterio $f_c = (3 : 5) \cdot f_2$.

La frequenza più bassa con la quale è possibile campionare un segnale, è denominata **frequenza di Nyquist (teorica)**, cioè nel caso $f_c = 2 \cdot f_{max}$.



SAMPLE/HOLD (campionamento/mantenimento): ha la funzione di prelevare a intervalli di tempo regolari "campioni" dal segnale alla frequenza di campionamento f_c e di mantenerne il valore in uscita per tutto il periodo di campionamento $T_c = 1/f_c$, in un modo da permettere la conversione A/D.

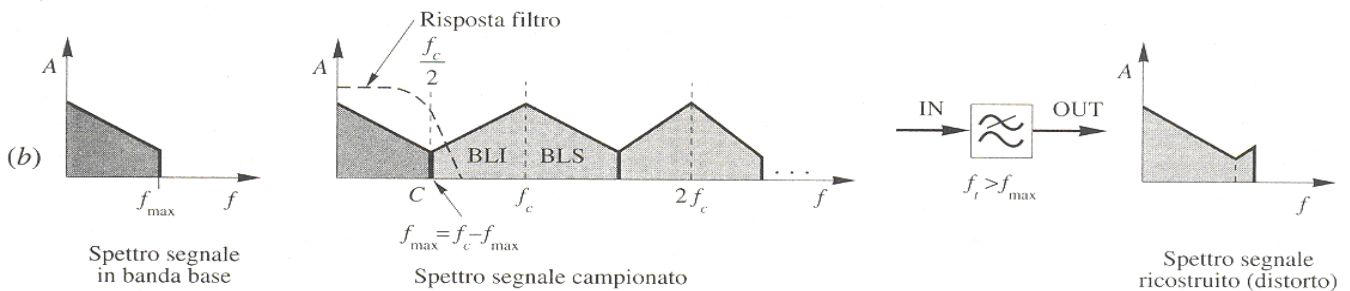


Un segnale sinusoidale per essere convertito in digitale senza l'impiego di un S/H, deve avere una frequenza (f_{max}) dello spettro del segnale analogico da campionare che soddisfi: $f_{max} \leq 1/(2^n \cdot T_{conv})$.

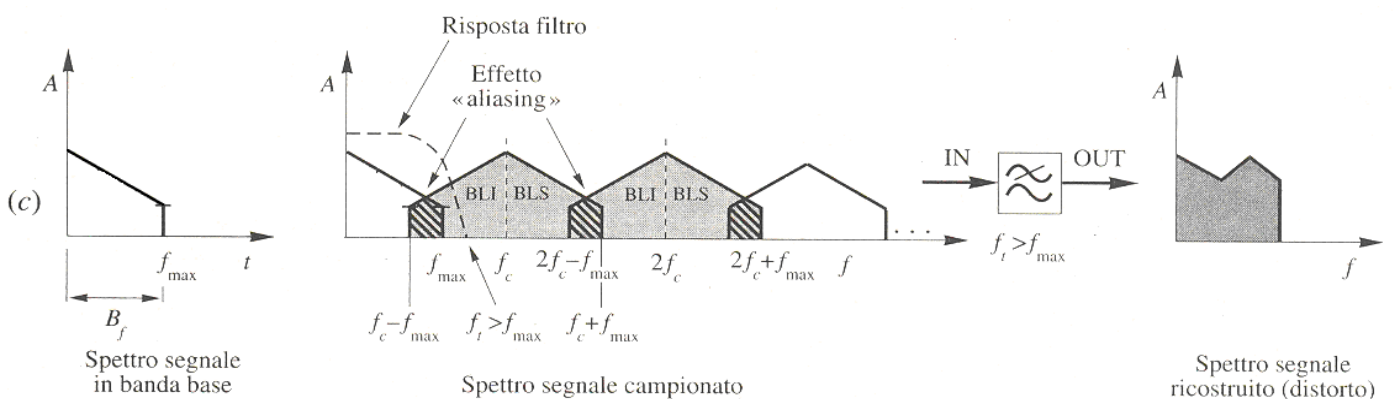
Una volta fissata la frequenza di campionamento $f_c = 1/T_c$, è necessario scegliere un convertitore A/D con tempo di conversione $T_{conv} < T_c$.

ALIASING

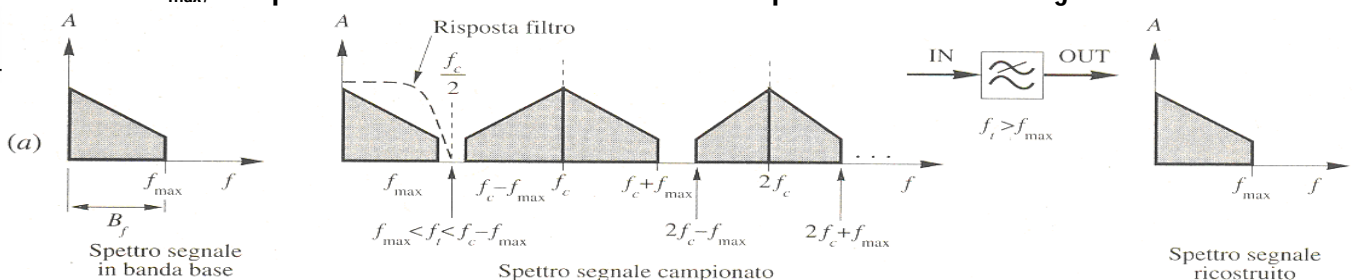
Nel caso $f_c = 2 f_{max}$, il teorema di campionamento è al suo limite minimo teorico, considerato accettabile, in pratica però risulta problematica per la corretta ricostruzione del segnale in quanto per separare la banda del segnale utile dalle altre frequenze occorre utilizzare un filtro ideale, è che molto difficile da realizzare.



Il mancato rispetto della condizione di Shannon determina una situazione, definita **aliasing** cioè, quando $f_c < 2 f_{max}$ risulta impossibile estrarre il segnale utile, perché si ha una sovrapposizione delle bande dello spettro e che risulta difficile ricostruirlo una volta ricevuto.



Nel caso $f_c > 2 f_{max}$, il rispetto della condizione di Shannon rende possibile ricostruire il segnale senza errori.



Il **filtraggio preventivo in ingresso** del segnale da campionare con filtro passa basso detto antialiasing ha una frequenza di taglio o banda: $f_t = f_c/2$.

La **ricostruzione** del segnale analogico originale si ottiene inserendo, nell'apparato ricevente, un opportuno filtro passa-basso in grado di lasciar passare solo la banda di frequenza $0:f_{max}$, con una frequenza di taglio è il seguente: $f_{max} < f_t < f_c - f_{max}$. Inoltre, è necessario l'impiego di un amplificatore per portare il segnale ai livelli di tensione richiesti dal C/AD.

Nella telefonia si assume come frequenza di campionamento il valore di:

$f_c = 8$ kHz superiore di 1,2 kHz rispetto al valore minimo: $2f_{max} = 6,8$ kHz essendo la frequenza di un segnale telefonico di circa $f_{max} = 3,4$ kHz.

Il periodo di campionamento corrisponde, naturalmente all'inverso della frequenza di campionamento, e cioè: $T_c = 1 / f_c = 1 / 8000 = 125 \mu s$



QUANTIZZAZIONE

La fase successiva prende il nome di quantizzazione, e consiste nella scelta di livelli discreti per i campioni così ottenuti, che nell'esempio seguente sono 8 di valori tutti uguali.

- La quantizzazione: indica il procedimento che porta a rappresentare un segnale attraverso un insieme limitato di valori distinti, separati da un intervallo finito **Q** detto "**Quanto**", che uguale al bit meno significativo **1 LSB**. $Q = V_{fs}/2^n$

V_{fs} : tensione di fondo scala che caratterizza il convertitore A/D.

n: il numero di bit del codificatore.

I livelli di quantizzazione $L = 2^n$ livelli.

R: Il poter risolutivo oppure la risoluzione del codificatore A/D,

$$R = Q$$

La risoluzione in percentuale:

$$R\% = 100/2^n$$

L'errore oppure rumore di quantizzazione, rappresenta lo scostamento tra il segnale analogico e il segnale quantizzato.

$$e_{max} = \pm Q/2$$

esempio:

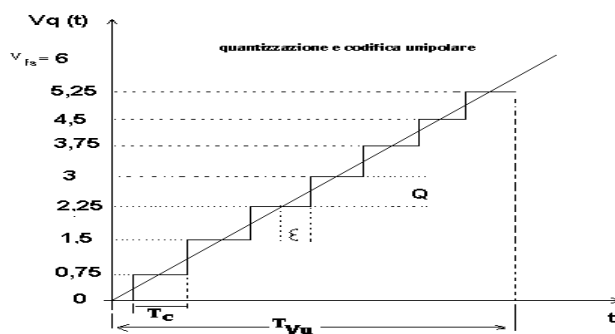


tabella di codifica

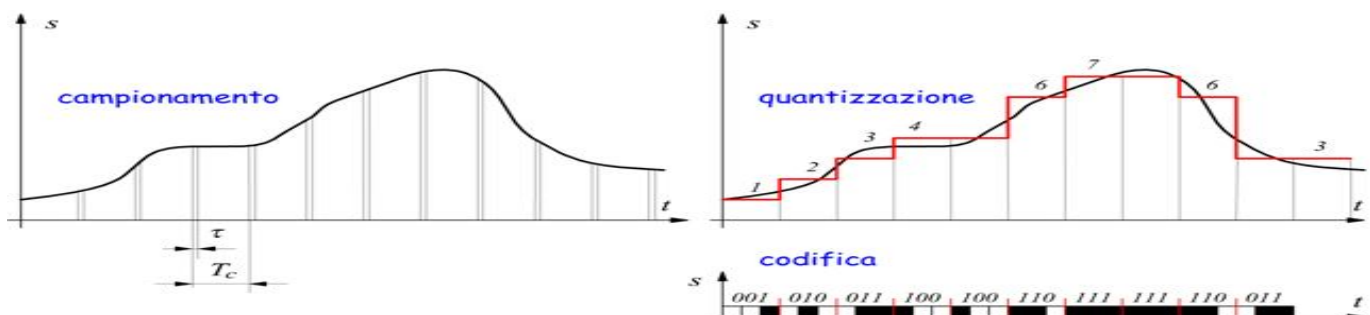
B2	B1	B0	Vq
0	0	0	0 V
0	0	1	0,75 V
0	1	0	1,5 V
0	1	1	2,25 V
1	0	0	3 V
1	0	1	3,75 V
1	1	0	4,5 V
1	1	1	5,25 V

$$T_{vu} = 2^n T_c$$

$$V_{umax} = V_{fs} - Q$$

CODIFICA

In questa terza fase gli impulsi, campionati e quantizzati, vengono codificati, cioè la loro ampiezza viene trasformata in una sequenza di bit secondo un codice binario. Ad esempio, se l'ampiezza del primo impulso è di 5 V, verrà rappresentata dalla sequenza binaria: 101.



ESERCIZI

- 1) Considerando fino alla settima armonica di un'onda quadra con frequenza 12 KHz, qual è la frequenza minima di campionamento ?
- 2) Un segnale PCM viene trasmesso in un canale a 48 Kbps,. Supponendo che il segnale sia stato quantizzato a 64 livelli, determinare la massima frequenza della modulante. (fatto a scuola)
- 3) Un sistema TDM è formato da 4 canali audio ($f_{\max} = 10$ KHz codificati a 8 bit), determinare la velocità di trasmissione e la banda del canale.
- 4) Dato il segnale sinusoidale $v(t) = 4 \sin(628t)$ determinare la trama che si ottiene campionando un periodo di tale segnale a frequenza 1 kHz e convertendo i campioni in PCM su 3 bit.
- 5) Essendo la frequenza di campionamento di 8 KHz, il numero di bit di codifica uguale a 8, e il numero di canali 24, calcolare il tempo dedicato al singolo bit e la banda del canale.
- 6) Si vuole codificare i campioni di un segnale analogico mediante 10 bit; sapendo che il valore picco-picco del segnale analogico è 3 Volt, determinare il numero di livelli, l' errore di quantizzazione.
- 7) Si vuole trasmettere con la tecnica PCM un segnale analogico avente valore minimo -3V e valore massimo 5V e banda 2,5 KHz. Calcolare: il numero dei livelli in modo che l' errore di quantizzazione sia 0,1V; il numero di bit di codifica; la frequenza di campionamento; la frequenza del bit.
- 8) Si vuole trasmettere secondo la tecnica TDM 6 canali audio aventi frequenza massima 15 KHz. Determinare la banda necessaria essendo la codifica a 8 bit. (fatto a scuola)
- 9) Dato il segnale sinusoidale $v(t) = 8 \sin(2512t)$ determinare la trama che si ottiene campionando un periodo di tale segnale a frequenza 3,2 kHz e convertendo i campioni in PCM su 5 bit.
- 10) Tre segnali analogici con $f = 4,5$ KHz e ampiezza 5V, vengono codificati con quantizzazione lineare con un errore di 10mV. Dopo aver determinato il numero di bit necessari, e sapendo che i segnali sono organizzati in una trama PCM costituita da tre canali di segnalazione e da un canale di sincronismo, scegliere un'opportuna frequenza di campionamento, determinare le temporizzazioni necessarie alla corretta formazione della trama e tracciare la sua struttura.
- 11) Si vogliono moltiplicare in tecnica TDM-PAM tre segnali sinusoidali le cui frequenze sono $f_1 = 1$ [kHz], $f_2 = 3$ [kHz] e $f_3 = 5$ [kHz]. Determinare la frequenza di campionamento idonea.
- 12) Determinare il periodo di campionamento dello schema di figura

