

## Istituto Tecnico Industriale “M. Panetti” – BARI

Tesina sviluppata dall'alunno Zito Fabio della classe 5 ETB.  
Esami di Stato 2003

# MODULAZIONE PAM

**Oggetto:** analizzare dal punto di vista teorico e pratico, mediante l'uso del trainer, la modulazione analogica ad impulsi PAM ed il processo di modulazione e demodulazione di segnali digitali secondo la tecnica TDM (multiplessaggio a divisione di tempo).

## STUDIO TEORICO

### GENERALITA'

La trasmissione dei segnali in forma digitale offre indiscutibili vantaggi rispetto ai sistemi in cui il segnale trasmesso è analogico. Il segnale analogico varia con continuità la sua ampiezza nel tempo ed è sensibile a qualsiasi disturbo che si sovrapponga; il segnale digitale varia, invece, tra due ampiezze fisse e definite nel tempo la cui intelligibilità è legata essenzialmente alla presenza piuttosto che al valore alterato dalla distorsione e dal rumore elettrico. L'interesse verso i sistemi di comunicazione digitale si è notevolmente accentuato nel tempo per i seguenti motivi:

- possibilità di trasmettere contestualmente al segnale telefonico, altre informazioni generate direttamente in forma digitale;
- possibilità di integrazione tra sistemi di trasmissione e centrali numeriche;
- possibilità di utilizzare mezzi portanti con elevatissima larghezza di banda trasmissiva, quali le fibre ottiche;
- evoluzione della tecnologia dei circuiti integrati che ha ridotto drasticamente il costo e le dimensioni degli apparati digitali.

### NUMERIZZAZIONE DEI SEGNALE CONTINUI E FORMAZIONE DEL SEGNALE PAM

Nei sistemi di trasmissione analogici, il segnale modulante, cioè l'informazione da trasmettere, fa variare l'ampiezza oppure la frequenza oppure la fase di un'onda sinusoidale detta portante. Nei sistemi di trasmissione digitali il segnale modulante può variare l'ampiezza (**PAM**-pulse amplitude modulation) o la posizione (**PPM**-pulse position modulation) oppure la durata (**PDM**-pulse duration modulation).

Il metodo PAM rappresenta il primo passo necessario alla trasformazione analogico/numerica di un segnale continuo.

Il processo è articolato in tre operazioni fondamentali:

- CAMPIONAMENTO
- QUANTIZZAZIONE  $\Rightarrow$  PCM
- CODIFICA

### CAMPIONAMENTO

Campionare una grandezza continua significa trasformarla in una successione temporale discreta di campioni, mediante il prelievo di valori istantanei di durata teoricamente nulla. Il campionamento di un segnale continuo pone il problema di stabilire il numero di impulsi necessari per riprodurre fedelmente l'informazione in essi contenuta. La soluzione che consente di preservare l'integrità del messaggio da trasmettere è dettata dal teorema del campionamento di Shannon:

*“se un'informazione reale e continua nel tempo è campionata ad intervalli regolari ad una velocità almeno doppia della massima frequenza presente nel messaggio, i campioni così ottenuti contengono tutta l'informazione intrinseca del messaggio originale”.*

Quindi il teorema di Shannon impone che il messaggio da trasmettere sia compreso in una banda limitata di frequenze, per cui è indispensabile filtrare il segnale prima di campionare.

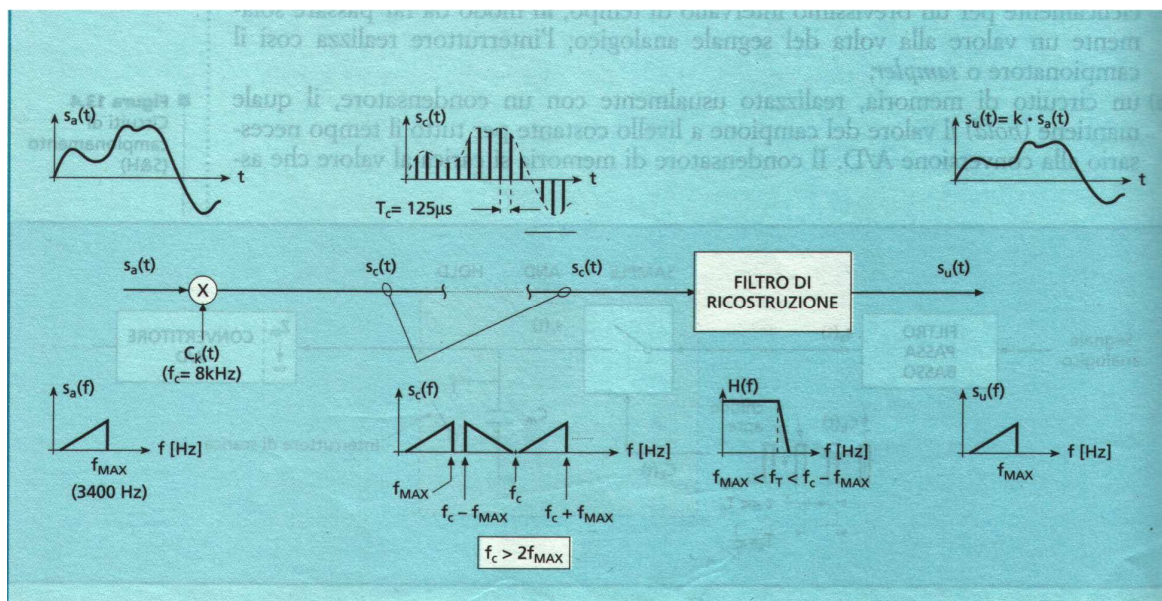
### CAMPIONAMENTO DEL SEGNALE TELEFONICO

E' noto che lo spettro di frequenze della conversazione media necessita di una larghezza di banda del circuito telefonico pari a 300-3.400Hz (3.1 kHz) denominata banda telefonica netta. Si definisce convenzionalmente banda telefonica lorda la larghezza di banda 0-4.000Hz (4 kHz). Per il teorema di Shannon, si può affermare che la ricostruzione integrale del segnale telefonico richiede l'invio di campioni con cadenza teorica di 6.800 periodi al secondo, cioè doppia della massima frequenza contenuta nello spettro del segnale. Tuttavia la scelta della frequenza reale di campionamento scaturisce da criteri di mediazione tecnico-economica:

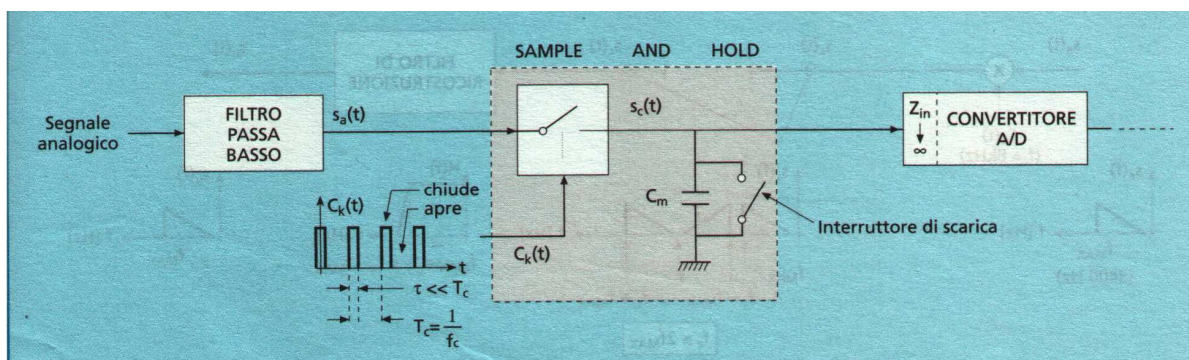
- una frequenza di campionamento maggiore di 6.8 kHz richiede una larghezza di banda più elevata del segnale PCM;
- una frequenza di campionamento uguale a 6.8 kHz comporta:
  1. rischi di diafonia nella banda fonica;
  2. complessità dei filtri passa basso indispensabili al funzionamento degli apparati PCM.

Dunque la frequenza di campionamento è stata fissata a 8.000 Hz. Ne deriva un periodo di campionamento pari a  $T_c = 125 \mu s$ .

Figura 1



L'operazione di campionamento è rappresentata in figura 2.



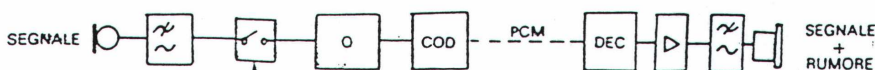
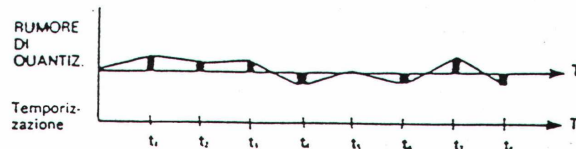
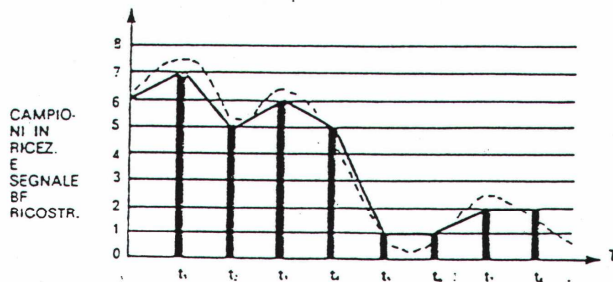
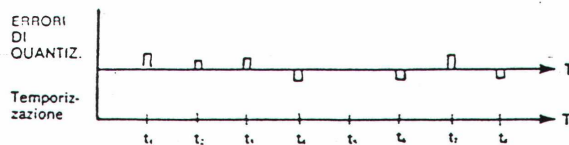
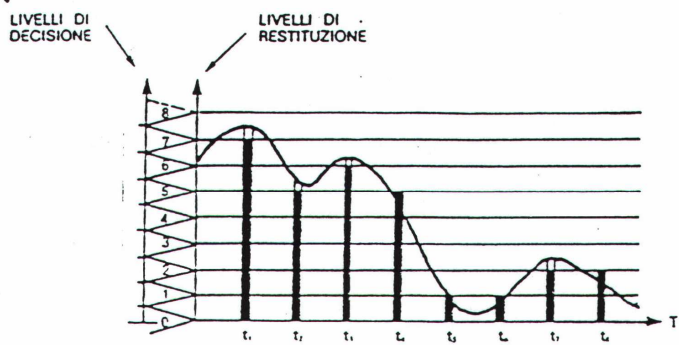
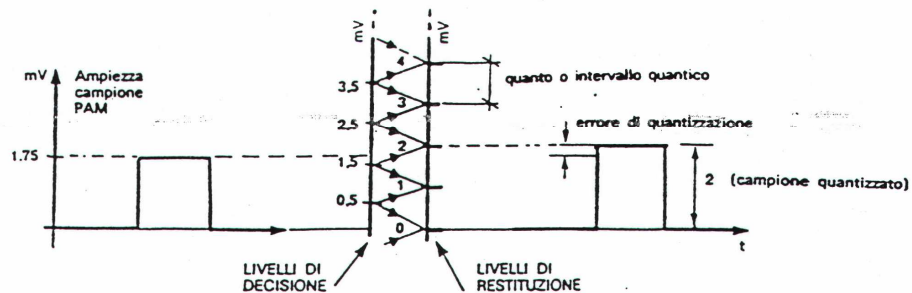
Il segnale vocale a 4 kHz, è inserito in un campionatore rappresentato per semplicità con un interruttore che si chiude 8000 volte al secondo, generando un treno di impulsi che costituiscono l'informazione da trasmettere modulata in PAM alla frequenza di 8 kHz.

Poiché la conversione in PAM è sempre una modulazione di ampiezza per il teorema di Fourier si possono considerare le onde sinusoidali che compongono i segnali rettangolari sia PAM che della portante. La rappresentazione che ne consegue è la classica della modulazione d'ampiezza e consente di esprimere due considerazioni:

1. per ricostruire il segnale vocale di ingresso è sufficiente in ricezione che il segnale PAM attraversi un filtro passa basso a 4 kHz;
2. un frequenza di campionamento inferiore a 8 kHz comporterebbe la sovrapposizione delle bande laterali rendendo impossibile la separazione con filtro passo basso.

## **QUANTIZZAZIONE**

Se gli impulsi modulati in ampiezza prodotti dal campionamento fossero inviati direttamente sul mezzo trasmissivo risentirebbero del rumore eventualmente presente e ne risulterebbe una distorsione del segnale ricevuto e, di conseguenza, del messaggio riprodotto. Per evitare deformazioni del segnale durante il percorso sul mezzo trasmissivo, che collega la stazione emittente con quella ricevente, si ricorre alla quantizzazione e codifica. Il processo di quantizzazione consiste nel confrontare il campione PAM con tensioni prefissate (livelli di decisione) ed associare al campione il valore di tensione più vicino (livelli di restituzione).



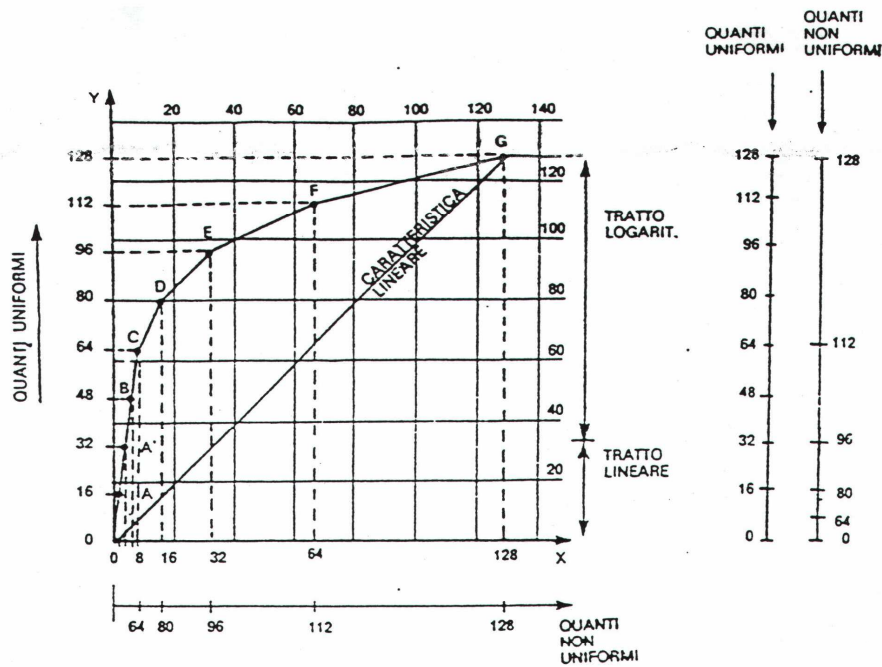
I livelli di restituzione si definiscono livelli quantici ed il salto tra due livelli quantici adiacenti si definisce quanto. Se i quanti sono uguali la quantizzazione si definisce lineare, altrimenti non lineare. Quindi il binomio campione PAM – livello di restituzione avviene per approssimazione: se l'ampiezza che cade in un quanto supera il valore medio dello stesso, è assegnata al livello quantico superiore altrimenti a quello inferiore. Da quanto esposto emerge che l'operazione di quantizzazione è necessariamente affetta da errore denominato errore di quantizzazione. Tale

errore sistematico si traduce nella pratica in un rumore chiamato rumore di quantizzazione. Il massimo errore, in valore assoluto, che si può commettere nel quantizzare il segnale è pari a  $1/2$  quanto. Il numero dei livelli fissati dallo standard europeo è 256, suddivisi in 128 per i segnali positivi e 128 per i segnali negativi. E' evidente che se si considera un segnale la cui ampiezza sia massima, l'errore di quantizzazione è una piccola parte del segnale. Se si esamina un segnale debole la cui ampiezza, ad esempio, sia inferiore al gradino quantico, l'errore è una notevole porzione di segnale. Quindi la quantizzazione lineare non garantisce un rapporto S/N lineare. Appare dunque chiara la necessità di ricorrere ad una quantizzazione non lineare, tale che gli intervalli quantici siano più piccoli per i segnali a basso livello e più grandi per i segnali ad alto livello. Per eseguire la quantizzazione non lineare si ricorre a dispositivi in grado di fornire una funzione di trasferimento in-out che esalti i segnali deboli ed attenui i segnali forti. Tali dispositivi si chiamano *compandor*.

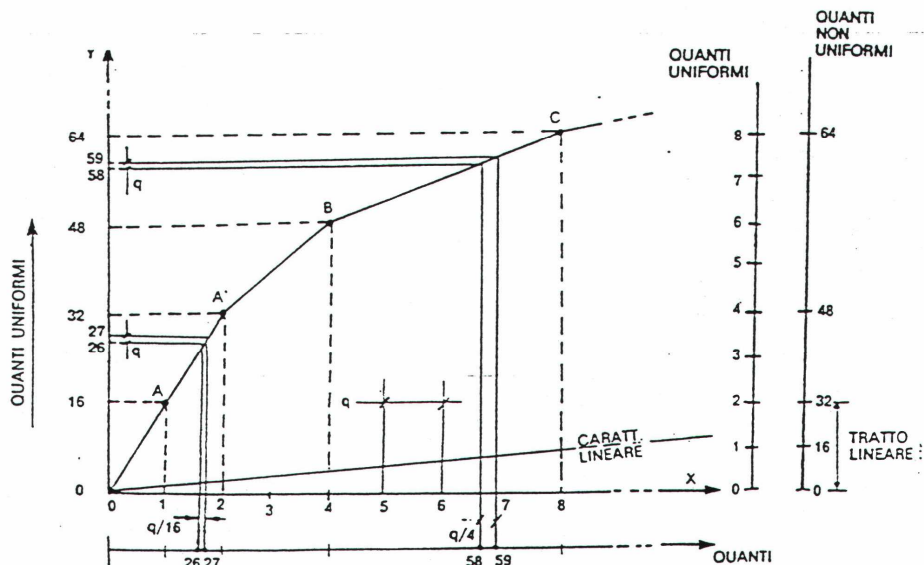
Le tecniche impiegate nella realizzazione dei compressori ed espansori si suddividono in due categorie:

1. analogiche, ormai superate;
2. numeriche.

La curva di quantizzazione non lineare è di tipo logaritmico denominata legge A, approssimata a 13 spezzate, con  $A=87.6$



« Companding Law » CEPT a tratti lineari.



L'espressione matematica di tale curva è:

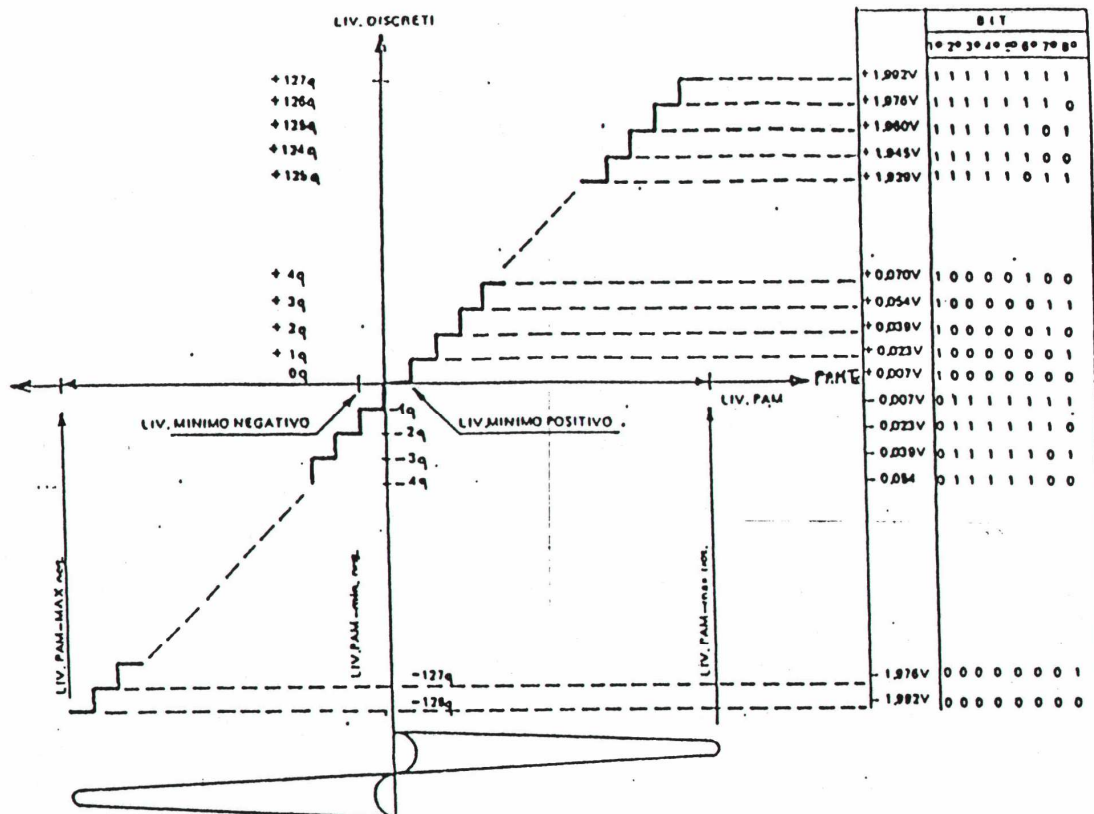
$$y = \frac{Ax}{1 + \ln A} \text{ per } 0 \leq x \leq 1/A$$

$$y = \frac{1 + \ln Ax}{1 + \ln A} \text{ per } 1/A \leq x \leq 1$$

dove A è un parametro adimensionale che caratterizza il tasso di compressione utilizzato ed x costituisce l'ampiezza relativa al segnale di uscita del compressore.

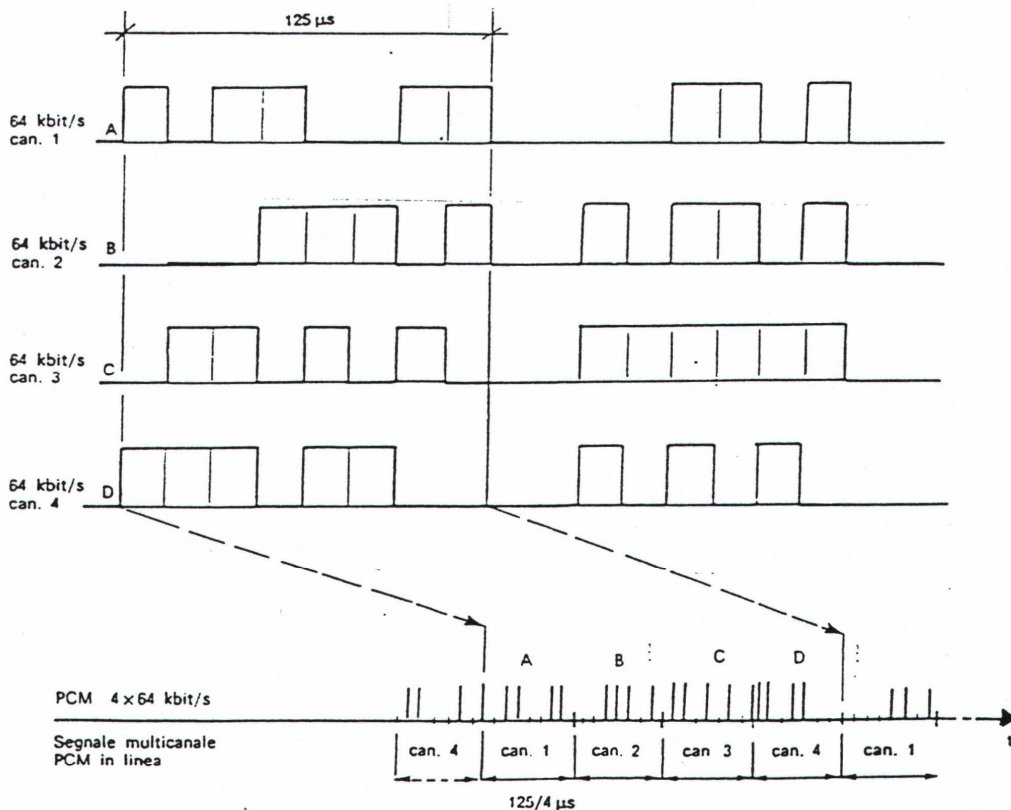
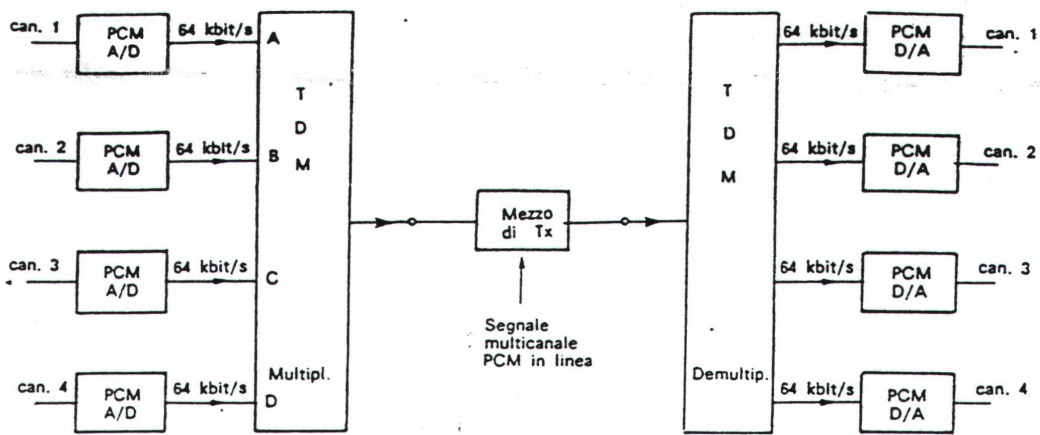
### CODIFICA

La codifica costituisce l'operazione fondamentale della modulazione a codice d'impulsi e consiste nel rappresentare il livello quantico attraverso un numero che, tramutato in segnale elettrico, può essere inviato sul mezzo trasmissivo. Tale segnale deve essere necessariamente una sequenza di impulsi che, attraverso lo stato di presenza o assenza, rappresenti il valore numerico dell'ampiezza del campione prelevato riconoscibile in ricezione; ossia il ricevitore deve poter contare la presenza o assenza degli impulsi opportunamente combinati e posizionati in precisi intervalli di tempo: se la presenza dell'impulso è caratterizzata dal simbolo 1 e l'assenza dal simbolo 0, si tratta di contare con soli due simboli, ovvero di introdurre una numerazione binaria. Il numero di bit previsti per la codifica del segnale PAM quantizzato è 8; il primo bit individua la polarità del campione, i rimanenti 7 rappresentano, in codice binario, il numero decimale del livello quantico.



### COMPRESSIONE NUMERICA

Si è visto che è possibile attuare la quantizzazione non lineare attraverso il processo di compressione numerica. Tale operazione si realizza mediante la codifica a 12 bit del campione PAM quantizzato linearmente e la successiva conversione del segnale PCM da 12 a 8 bit, nel rispetto della legge di tipo A.



Principio della tecnica di moltiplicazione TDM-PCM.

## ESPANSIONE NUMERICA

E' l'operazione esattamente complementare alla compressione nel rispetto della legge di tipo A.

## LA MULTIPLAZIONE

In un sistema di comunicazioni il trasmettitore e il ricevitore sono connessi tramite un canale di trasmissione come lo spazio libero nelle trasmissioni radiotelevisive e telefoniche con antenne, oppure linee elettriche nel caso di trasmissioni telefoniche e dati che impiegano la rete telefonica. Per sfruttare al meglio le potenzialità trasmissive del canale di comunicazione si ricorre alla tecnica della moltiplicazione. Essa consente di trasmettere simultaneamente più trasmissioni nello stesso canale. Ad esempio, in campo radiofonico, è possibile allocare contemporaneamente circa 100 canali in AM e altrettanti in FM. La moltiplicazione può essere ricondotta a due tecniche fondamentali a seconda del tipo di modulazione utilizzata:

1. Moltiplicazione FDM (frequency division multiplexing) che impiega modulazioni analogiche di ampiezza e frequenza;
2. Moltiplicazione TDM (time division multiplexing) che impiega la modulazione impulsiva PCM.

## MULTIPLAZIONE TDM

La moltiplicazione TDM è una tecnica utilizzata in campo telefonico, in congiunzione con la modulazione d'impulsi per trasmettere più canali contemporaneamente nello stesso mezzo trasmissivo. Essa consiste nell'assegnare ad ogni parola binaria da trasmettere un prefissato intervallo di tempo a differenza della FDM nella quale si assegna un intervallo di frequenza. Nella modulazione ad impulsi PCM la frequenza di campionamento è fissata a  $f_c=8\text{kHz}$  e pertanto l'intervallo di tempo tra due campioni successivi vale:

$$T_c = 1 / f_c = 125\mu s$$

Entro questo intervallo di tempo è possibile allocare altri segnali. Il numero di canali e le relative caratteristiche elettriche sono stabilite da norme internazionali. Nel sistema europeo il CCITT ha fissato a 32 il numero di canali, di cui 30 per comunicazioni tra utenti e 2 riservati per informazioni di servizio. L'insieme di questi canali è denominato trama o fascio PCM. Per avere 32 canali nel tempo  $T_c = 125\mu s$  si deve assegnare ad ogni canale un tempo  $T_{CAN}$ :

$$T_{CAN} = \frac{T_c}{32} = 3.9\mu s$$

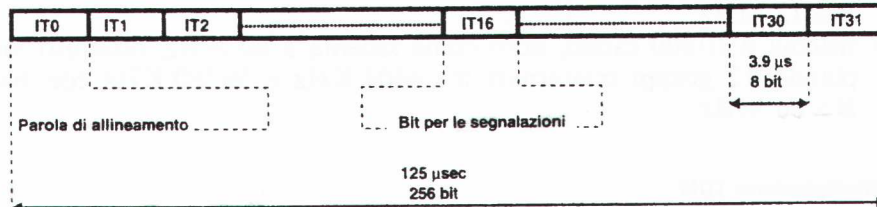
Poiché ogni canale PCM è costituito da una parola binaria seriale di 8 bit, la durata di ogni  $T_{bit}$  vale:

$$T_{bit} = \frac{T_{CAN}}{8} = 488ns$$

la velocità di trasmissione dell'informazione PCM lungo la linea telefonica risulta:

$$v = \frac{1}{T_{bit}} = 2.048\text{Mbit} / \text{sec}$$

Tale velocità è denominata frequenza di ripetizione. Quando il segnale moltiplicato giunge al ricevitore questo sarà interessatola una successione di bit che a gruppi di 8 rappresentano i campioni dei diversi canali trasmittenti. Il ricevitore deve essere quindi sincronizzato con il trasmettitore per poter discernere tra le varie informazioni altrimenti sarebbe impossibile la separazione logica dei diversi messaggi. Il sincronismo tra trasmettitore e ricevitore viene assicurato da uno dei due canali di servizio, detto canale di allineamento di trama che contiene una parola di 8 bit che consente la sincronizzazione tra apparato ricevente e trasmettente. In figura 5 si mostra la schematizzazione di una trama PCM a moltiplicazione di tempo.



I 32 canali sono così suddivisi:

- IT0 è dedicato all'invio delle parole di allineamento indispensabili per assicurare la corretta sincronizzazione tra trasmettitore e ricevitore. Le parole di allineamento vengono denominate A, per le trame pari e B per quelle dispari;
- IT16 è impiegato per l'invio delle segnalazioni e per assicurare la sincronizzazione di multitrama.
- I timeslot da IT1 a IT5 e da IT17 a IT31 sono occupati da messaggi fonia e dati dell'utente.

La moltiplicazione descritta è del primo livello. In pratica vengono utilizzate gerarchie di moltiplicazione PCM a livelli superiori che consentono di trasmettere fino a 7680 canali nello stesso mezzo trasmissivo. Nel sistema Europeo si hanno i seguenti livelli gerarchici oltre al primo già descritto:

- 2° livello a 120 canali fonici con frequenza di cifra  $f_c=8.448$  Mbit/sec;
- 3° livello a 480 canali fonici con frequenza di cifra  $f_c=34.368$  Mbit/sec;
- 4° livello a 1920 canali fonici con frequenza di cifra  $f_c=139.264$  Mbit/sec;
- 5° livello a 7680 canali fonici con frequenza di cifra  $f_c=564.992$  Mbit/sec;

## ESPERIENZA PRATICA

L'esercitazione di laboratorio è essenzialmente basata sull'utilizzo dell'oscilloscopio e del trainer. Di quest'ultimo si riporta un'accurata descrizione.

### TRAINER

La descrizione dei vari blocchi del trainer è la seguente:

Generatore a 4 toni.

Questo è un circuito ausiliario che attualmente non fa parte del sistema di trasmissione ma è incorporato nell'unità per facilitare l'uso del trainer. Questo blocco prevede due segnali test sinusoidali, separati e regolabili fra 0 e circa 8 Vpp. Le onde sinusoidali sono ottenute da una sorgente di onda quadra comune da susseguenti divisioni di onde quadre di: 2720, 1380, 760, 3340 Hz (valori nominali). Le onde quadre sono filtrate con filtro passa-basso per ottenere onde sinusoidali. Il vantaggio di quanto sopra risulta chiaro utilizzando il trainer; i 4 segnali test hanno relazione di fase costante uno con l'altro, ciò consente di visualizzare sull'oscilloscopio nitide e pulite forme d'onda. L'uso di 4 segnali senza una precisa relazione non consentirà una buona visualizzazione dei segnali. La frequenza dell'oscillatore master alla massima ampiezza del segnale di test può essere regolata, se necessario dal trimmer del trainer.

### **AMPLIFICATORE DI INGRESSO/LIMITATORE DI AMPIEZZA E FREQUENZA**

Questo blocco consente di adattare i livelli e l'interfacciamento del multiplexer ai fattori esterni. Inoltre, l'amplificatore consente di limitare l'ampiezza (tagliare i picchi) e proteggere da sovraccarichi gli stadi seguenti.

Anche la limitazione di banda (circa 300 e 3000 Hz) consente questo. Si noti che la frequenza di taglio superiore è a polo singolo, filtrato con passa basso, la cui componente rimanente di alta frequenza consente di esaminare il fenomeno di aliasing.

### **GENERATORE DI SINCRONIZZAZIONE**

Questo blocco consente, partendo da una sorgente comune, di definire le sincronizzazioni del segnale richiesto per la trasmissione. Questi segnali sono:

- T1, T2, T3, T4: onde quadre, duty-cycle 25%, sfasatore 90° di ritardo.  
Ognuno dei 4 segnali appare a impulsi ridotti e viene attivato in sequenza. Uno dopo l'altro sono attivati gli switch analogici per multiplexare in PAM i 4 segnali di ingresso (CH1.....CH4).
- FRAME SYNC e CH SYNC: questi segnali consentono al ricevitore di sincronizzarsi con il trasmettitore, questo abilita il ricevitore a corrette demultiplazioni dei segnali TDM e riattribuisce a ogni canale il corrispondente segnale ricevuto dal trasmettitore.
- Tale training è un modello a canali di un sistema TDM e ogni canale ha una frequenza media di banda passante (300 a 3KHz), il campionamento nominale per ogni canale è a 8 KHz quindi la sincronizzazione nominale per le operazioni TDM è a 4 canali x 8 KHz = 32 KHz. L'oscillatore master del trasmettitore è variabile nel range di circa 20 a 40 KHz per consentire di analizzare come la qualità della trasmissione dipenda dal campionamento.

### **MULTIPLEXER ANALOGICO**

Questa è una sezione di 4 switch analogici, circuiti allo stato solido con transistor MOS canale P ed M. Questi circuiti sono ingegnerizzati con tre morsetti "black box". Due morsetti sono segnali bidirezionali ingresso/uscita o viceversa, il terzo morsetto controlla i pin. Un livello alto di questo PIN determina il lavoro dello switch (chiuso) che consente il passaggio del segnale. Questi circuiti consentono operazioni on/off molto veloci in un range di 10 MHz. Le 4 sincronizzazioni del segnale da T1 a T4 sono impiegate per attivare in sequenza i 4 switch analogici, uno per ogni canale. Il segnale risultante all'uscita comune è una forma d'onda sincronizzata multiplexata di 4 ingressi da CH1 a CH4.

### **GENERATORE PWM**

Questo blocco è un comparatore. La portante a dente di sega è applicata ad un ingresso mentre il segnale PAM TDM è applicato all'altro ingresso. Il comparatore fraziona ogni campione PAM e produce un impulso per campione la cui larghezza è proporzionale all'ampiezza del livello del campione quando è convertito da PAM a PWM.

### **CONVERTITORE PWM A PPM**

Viene generato un piccolo impulso in relazione all'ampiezza del segnale analogico originale.

### **GENERATORE DI SINCRONIZZAZIONE RX**

Questo blocco riceve e analizza la SYNC informazione inviata dal trasmettitore. Si ricordi che CH SYNC è un impulso posizionato all'inizio di ogni intervallo del segnale TDM mentre FRAME SYNC è un impulso posizionato alla partenza di ogni nuova struttura TDM. Praticamente coincide con T1, sincronizza l'impulso per canale 1, che è la prima trasmissione di ogni ciclo TDM.

### **DEMULTIPLAZIONE ANALOGICA**

Questo blocco è un multiplexer ed è composto da 4 switch analogici con ingressi legati insieme. I controlli degli ingressi degli switch sono attivati in sequenza, in fase con l'entrante segnale TDM. Questo permette di inviare correttamente ogni campione del segnale multiplexato ricevuto.

### **AMPLIFICATORE DI USCITA E FILTRI.**

Questo è un interruttore seguito da filtri passa-basso attivi ricostruendo la forma del segnale originale del canale.

## INTERFACCIA RX PAM

Questo è un terminale ricevente per il segnale TDM PAM distribuito dal trasmettitore PAM e chiamato TX PAM. Quando lavora con PAM, l'uscita di questo circuito è connessa al demultiplexer analogico per il seguente processo.

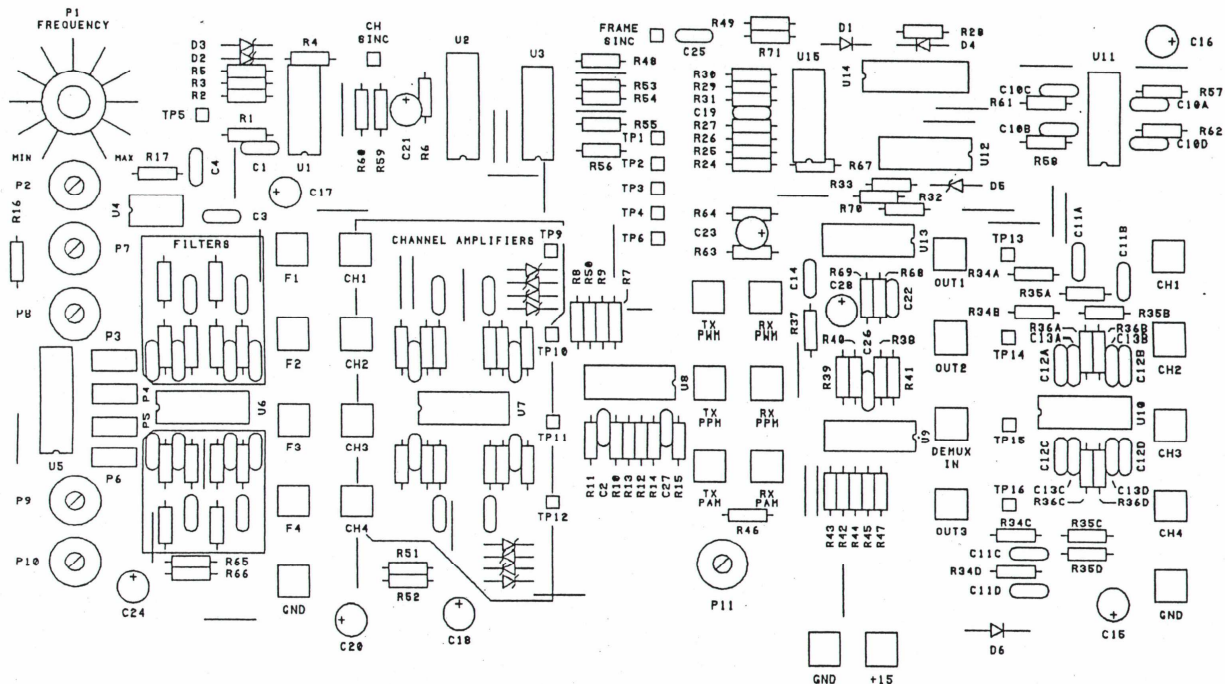
## INTERFACCIA RX PWM

Questo è il terminale ricevente per il segnale TDM PWM distribuito dal trasmettitore sull'uscita TX PWM. La conversione PWM - PAM è realizzata per mezzo di una sorgente di corrente regolabile, switched sulla funzione di ciclo per cui il segnale PWM è attivato in ogni intervallo. Questo segnale appare come un segnale PAM - TDM resettato nel demultiplexer. Il susseguente processo è PAM.

## INTERFACCIA RX PPM

In questa fase il segnale PPM ricevuto è convertito in PWM e poi in PAM come segue. La conversione PPM a PWM è eseguita nel seguente modo : ogni impulso PPM triggera un flip-flop che resetta e da inizio ad un susseguente intervallo. La forma d'onda risultante (segnale Q del flip-flop) è un onda quadra il cui duty-cycle dipende dalla posizione dell'impulso PPM. Il prossimo passaggio è simile al processo del caso PWM.

B4310A - PULSE MODULATION



L'esercitazione pratica consiste nell'analizzare la multiplazione secondo la tecnica TDM di quattro segnali PAM ed il loro recupero. Il trainer consente di trasportare 4 segnali PAM nello stesso tempo senza interferenze o aumento della frequenza della banda base. Ognuno dei quattro segnali prevede frequenze comprese tra i 300 e i 3 KHz e può dunque costituire la rappresentazione di 4 conversazioni telefoniche. Il clock dell'impulso del generatore di uscita è un'onda quadra con 25% duty-cycle a 8 KHz ed è utilizzato come porta su uno switch elettronico analogico. Lo stesso impulso della porta è ritardato di 90° (un quarto di ciclo) ed è usato come porta su un altro switch elettronico analogico. Analogamente un terzo impulso è ritardato di altri 90° ed un quarto di un ulteriore quarto di ciclo di ritardo. I 4 segnali PAM sono sommati in maniera lineare nell'amplificatore.

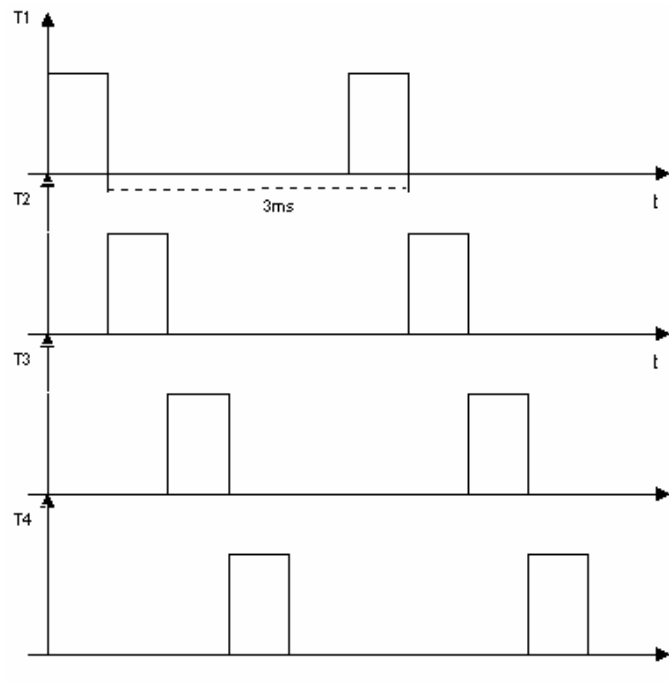
Il recupero del segnale TDM avviene nella seguente maniera. Quando un segnale TDM è trasportato nella rete fino al ricevitore, è accompagnato da un'informazione per costruire e sincronizzare, per permettere al ricevitore la corretta riattribuzione dell'informazione di ogni piccolo intervallo al suo giusto canale di destinazione. L'informazione richiesta consiste in una strutturazione e sincronizzazione dell'informazione con intervalli-tempi sincronizzati. In

particolare il ricevitore ha un sincronizzatore che seleziona le oscillazioni con una uscita che è ritardata allo stesso modo di quella del modulatore. Nel nostro caso la linea seleziona gli impulsi dei canali con un ritardo pari al fattore  $90^\circ$ . Il canale 1 avrà uno switch analogico come per il trasmettitore che sarà sintonizzato allo stesso modo del segnale del sistema. Analogamente per i canali 2, 3 e 4. Quindi i 4 segnali saranno separati entro circuiti individuali, un filtro passa basso (integratore) ricostruirà gli impulsi e definirà il segnale analogico.

L'esercitazione è stata condotta in tale maniera:

**1 – sincronizzazione delle trasmissioni:**

Si sono visualizzati sull'oscilloscopio le forme d'onda T1, T2, T3, T4 FR SYNC e CH SYNC. La forma d'onda di ogni segnale è stata esaminata e misurata. E' necessario che i quattro ck siano sfasati tra loro di  $90^\circ$  e che il loro periodo sia pari a 3ms



**2-generatore a 4 toni:**

Si sono visualizzati sull'oscilloscopio F1, F2, F3, F4 (segnali analogici); definire il loro livello, controllando e misurando le frequenze.

**3-amplificazione, delimitazione e campionatura dei segnali analogici**

**4- multiplessaggio**

I quattro segnali analogici (tributari) vengono confluiti agli ingressi di un multiplexer pilotato dai quattro tempi T1, T2, T3, T4

**5-demodulazione**

Il segnale PAM viene inviato al demodulatore al quale giungono anche i quattro segnali di timing generati dal "timing generator". Quest'ultimo per effettuare la sua funzione viene pilotato dai due segnali CH SYNC (sincronia di canale) e FRAME SYNC (sincronia di trama).

**6-recupero dei segnali**

i segnali in uscita dal demodulatore, costituiti ognuno dalla successione di campioni, vengono inviati ad un filtro a bassa frequenza il quale riproduce i segnali analogici di partenza.