



Claudio Di Girolamo (jordan20)

LA TECNICA PCM: IL TESORO "NASCOSTO" DELLA TRASMISSIONE DATI (PARTE II)

3 February 2013

Come anticipato nelle conclusioni alla Parte I, in questo articolo parleremo delle tecniche di multiplazione che interessano i sistemi PCM e tratteremo sia le caratteristiche implementative che le modalità per la generazione della trama e multitrama PCM.

1 Memorandum introduttivo

Riprendiamo preliminarmente qualche cifra da tenere a mente, già vista nella [Parte I](#), utile per il proseguo della nostra trattazione:

- **banda netta** del canale telefonico: da 300 Hz a 3,4 kHz;
- **frequenza di campionamento** telefonico: $f_c = 8 \text{ kHz}$;
- **intervallo di campionamento**: $T_c = 1/f_c = 125 \text{ }\mu\text{s}$;
- **durata** dell'impulso di campionamento: $\tau = 2 \text{ }\mu\text{s}$;
- **numero di bit** per la codifica di ciascun campione PAM: 8 bit/campione;
- **velocità di trasmissione** del segnale numerico PCM a 8 bit:
$$V = n \cdot f_c = 8[\text{bit}] \times (8 \times 10^3)[1/\text{s}] = 64 \times 10^3 \text{ bit/s} = 64 \text{ kbit/s}.$$

Abbiamo già visto come trasformare un segnale fonico (continuo) in un segnale numerico mediante il metodo della numerizzazione; in particolare, abbiamo analizzato il segnale all'uscita del modulatore PAM, che risulta essere discreto nel tempo e successivamente lo abbiamo reso discreto nelle ampiezze mediante il processo di quantizzazione.

Il segnale siffatto però non è chiaramente adatto per essere trasmesso, in quanto possiede un numero troppo elevato di livelli: sarebbero infatti necessari apparati di riconoscimento dotati di un numero eccessivo di soglie con costi elevati e non indifferenti complicazioni circuitali.

Si è quindi visto che la soluzione al problema è quella di trasmettere sui mezzi trasmissivi, non il segnale numerico multilivello, ma i numeri dei livelli discreti di tale segnale sotto forma di **codice binario** realizzato da impulsi a due livelli (**1** e **0**); nella fattispecie, il processo di codifica che segue quello di quantizzazione, prevede l'assegnazione, per **ogni** campione PAM trasmesso, di un codice di 8 impulsi binari, o

meglio di una **parola** composta da **8 bit**. Per semplicità, si può supporre che il codice trasmesso sia direttamente il codice binario puro rappresentante il numero decimale del livello discreto (ad esempio **0000011** per la rappresentazione dell'ampiezza del campione PAM pari a **+3**).

Come noto, mediante 8 bit è possibile realizzare 256 combinazioni; abbiamo già visto però che il bit più significativo (MSB) è assegnato alla **polarità** del campione, quindi soltanto i rimanenti 7 sono impiegati per la rappresentazione binaria dell'ampiezza ($2^7 = 128$ livelli, dallo **0** al **127°**).

Poiché fra un campione ed il successivo intercorre un periodo della frequenza di campionamento, gli 8 bit possono essere collocati in tale intervallo di tempo venendo così a costituire un vero e proprio segnale "telegrafico" che contiene, in forma codificata, l'informazione di un segnale telefonico: questo è esattamente il **segnale PCM** pronto per essere trasmesso. La figura sottostante sintetizza in linea di principio il processo appena descritto:

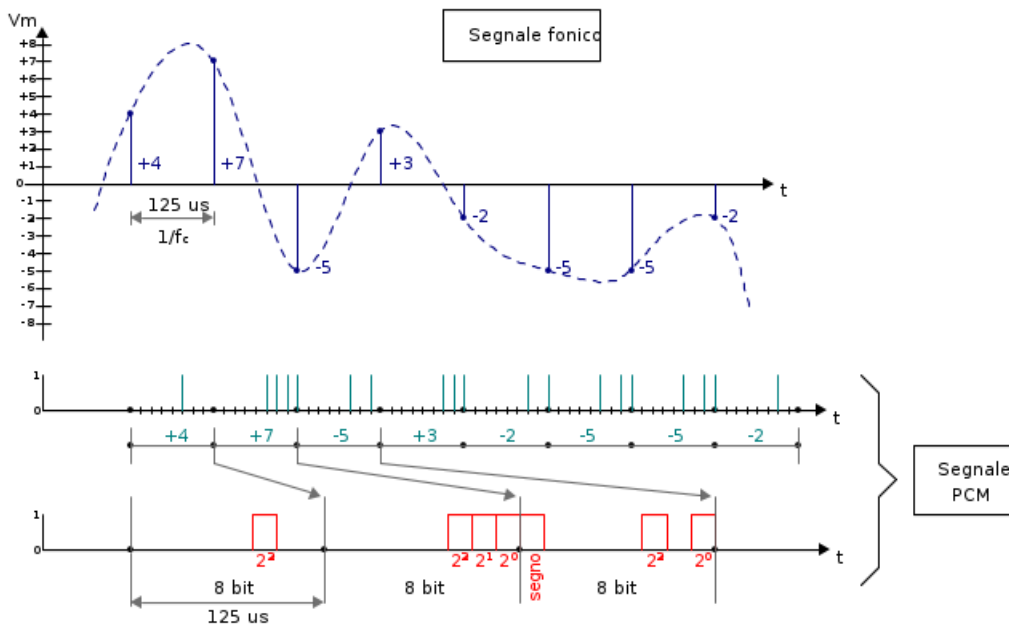


Fig.1 - Conversione da segnale fonico a numerico

dove si è assunto che il bit più significativo sia impostato a **0** in caso di ampiezza positiva del campione e ad **1** in caso di ampiezza negativa.

Pertanto, ottenuto così un segnale numerico a soli due livelli, è possibile sfruttarne i suoi vantaggi ed effettuare (come si è detto) trasmissioni praticamente immuni dai disturbi e dalle distorsioni dei sistemi di trasmissione.

E' chiaro che i vantaggi così acquisiti non sono però ottenuti "gratuitamente": è stato necessario effettuare un'operazione di quantizzazione di ampiezza che ha introdotto sul segnale una certa degradazione, anche se controllata e del tutto tollerabile.

Inoltre appare evidente la **maggiore occupazione di banda** che il segnale

telefonico numerico ha rispetto al segnale telefonico continuo; infatti lo spettro del segnale "telegrafico" (secondo diagramma temporale di Fig.1) è quello di un segnale impulsivo con periodo pari a:

$$T = \frac{125 \text{ } [\mu\text{s}]}{8 \text{ [bit]}} \cong 15,6 \text{ } \mu\text{s} \Rightarrow f \cong 64 \text{ kHz}$$

cioè lo spettro in banda base del segnale si è "**dilatato**" da **3,4 kHz** a circa **64 kHz** nel passaggio dal continuo al discreto, come mostra la seguente figura (la scala in frequenza non è in proporzione, ma solo a scopo illustrativo):

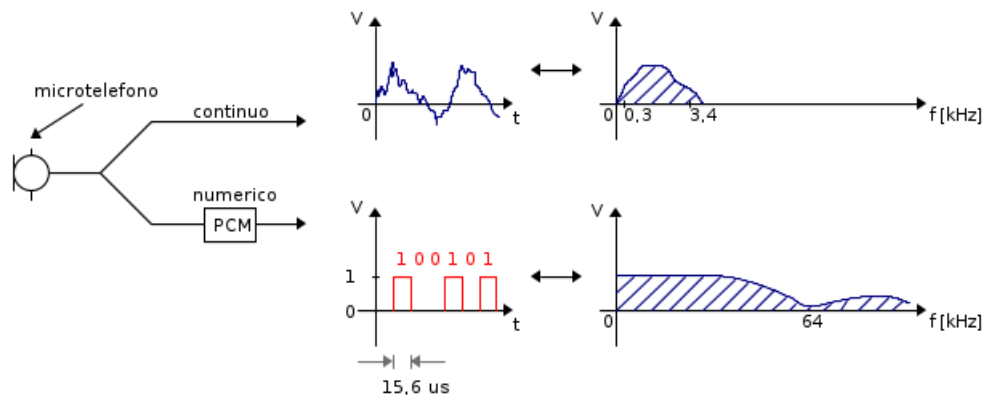


Fig. 2 - Differenze fondamentali fra segnale telefonico continuo e numerico

Nonostante questa differenza sostanziale in termini spettrali, abbiamo già avuto modo di constatare che il bilancio è tuttavia sicuramente a favore della numerizzazione delle informazioni continue non solo per ottenere i vantaggi di una trasmissione più semplice e immune da disturbi, ma anche per una serie di ragioni di costi, prestazioni e di ottimizzazione delle reti di telecomunicazioni che saranno ulteriormente evidenti nel seguito dell'articolo.

2 Moltiplicazione di canali telefonici numerici nel dominio del tempo

E' giunto finalmente il momento per discutere la tecnica della **moltiplicazione**, ossia la **capacità di un sistema di trasmettere contemporaneamente più segnali informativi sullo stesso canale fisico**.

Le classiche tecniche della modulazione di ampiezza **AM** e frequenza **FM**, impiegate in campo radio-televisivo, sono esempi di sistemi che impiegano la moltiplicazione; in questi sistemi la moltiplicazione è di tipo **FDM (Frequency Division Multiplexing)** e la possibilità di "**affasciare**" più trasmissioni contemporanee deriva dal fatto che ad ogni stazione trasmittente è assegnata una ben determinata banda di frequenza

distante dalle altre.

Nel caso si voglia invece affasciare canali telefonici già resi numerici sotto forma di flusso di impulsi a 64 kbit/s, il metodo più immediato è quello di **intercalare nel tempo, uno di fianco all'altro ed in pacchetti da 8 bit**, i campioni numerici dei vari canali da moltiplicare. In questo modo sul mezzo trasmissivo viene a trovarsi un **flusso di bit a velocità N volte maggiore**, se N sono i canali moltiplicati, con la caratteristica che **ogni campione numerico di 8 bit NON copre più di un intervallo di tempo di 125 μ s**, come nel segnale a 64 kbit/s di partenza, **ma solamente un tempo di 125 μ s/N**.

La tecnica appena descritta in termini generali sfrutta il **principio di moltiplicazione nel dominio del tempo TDM (Time Division Multiplexing)** di canali telefonici numerici a 64 kbit/s. La seguente figura schematizza tale principio applicato a 4 canali fonici:

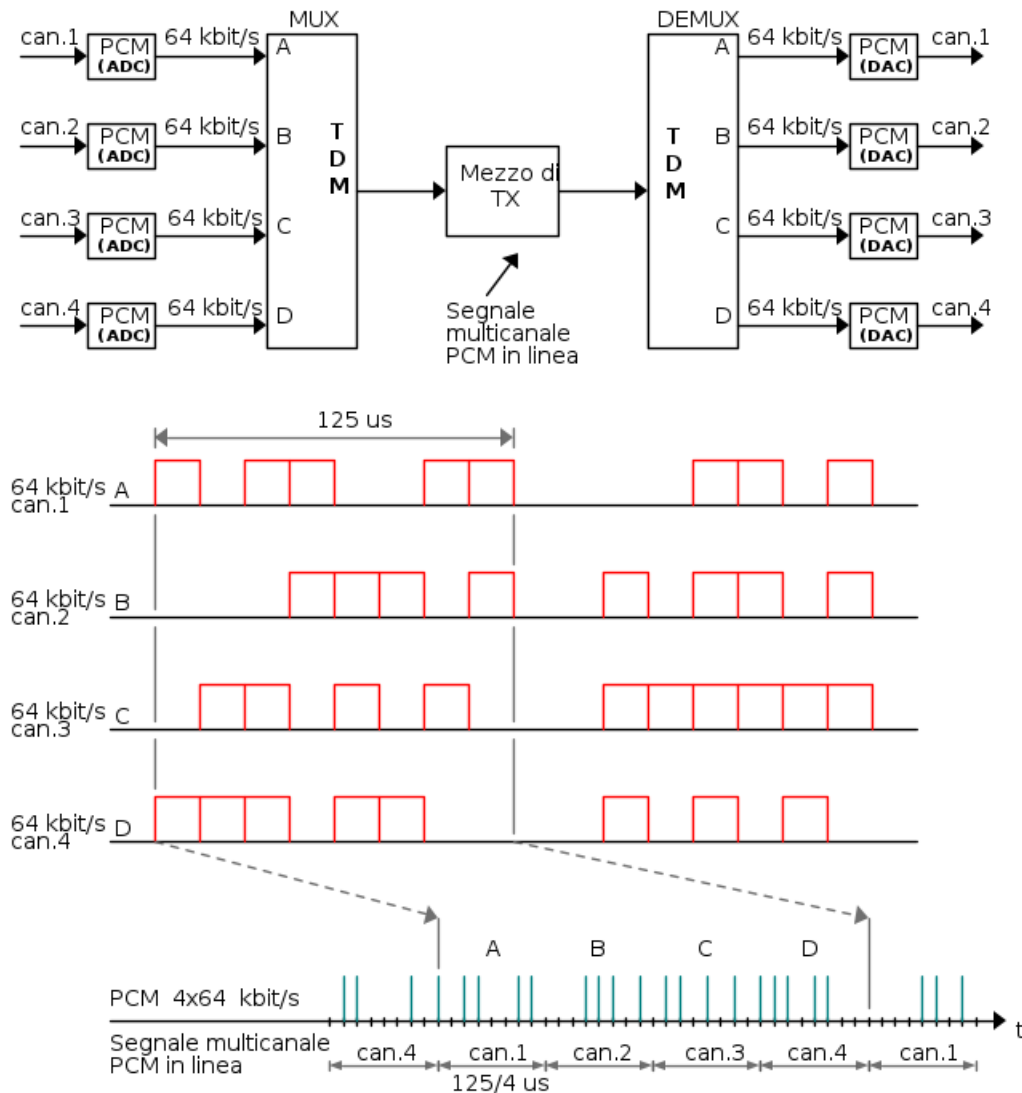


Fig.3 - Principio della tecnica di multiplazione TDM-PCM per 4 canali fonici

Dopo la conversione, da segnale continuo a numerico di ogni canale telefonico, il segnale PCM a 64 kbit/s viene **"impacchettato"** a 8 bit per volta in un tempo pari a $125 \mu\text{s}/N$ ed affiancato nel tempo agli altri canali PCM; in sostanza gli **"ottetti"** di ciascun canale vengono compressi nel tempo per **"fare posto"** ad altri ottetti, cioè ad altri canali.

Il segnale PCM, che a questo punto si definisce **multicanale di linea**, pur essendo a "velocità telegrafica" N volte maggiore, possiede tutte le caratteristiche di larga immunità al rumore ed alle distorsioni del mezzo trasmissivo e quindi vengono ancora garantiti i vantaggi visti a proposito della numerizzazione dei segnali continui. Purché le degradazioni subite dal segnale PCM lungo il mezzo trasmissivo siano tali da non provocare il superamento di una determinata **soglia di tasso di errore**, si può dire che la qualità dei canali telefonici non risente largamente delle variazioni del rumore

e delle distorsioni del segnale PCM.

Nella parte ricevente del Multiplex TDM-PCM, sarà necessario isolare nel tempo i vari pacchetti da 8 bit appartenenti al medesimo canale e ricostruire poi un flusso a 64 kbit/s: da questo, mediante un'operazione inversa a quella di trasmissione, vengono ricostruiti i campioni discreti (decodifica) e dopo un'operazione di filtraggio viene restituito il segnale di bassa frequenza, affetto solamente dal rumore di quantizzazione (come visto nella Parte I).

Rimane solamente da accennare a quanto verrà sviluppato successivamente e cioè alla necessità di prevedere, fra i vari ottetti multiplati del PCM multicanale, l'introduzione di un particolare ottetto riconoscibile dal ricevitore con il quale **allineare** l'apparato TDM di ricezione con quello di trasmissione, al fine di **demultiplexare correttamente** i vari ottetti ricevuti. Si tratta in sostanza di prevedere un **canale di servizio** fra lato Tx e lato Rx in modo che ogni ottetto sia **restituito al proprio canale di appartenenza**.

Potrebbe sembrare che lo schema *Fig.3* sia poco vantaggioso in termini di difficoltà implementativa e di risparmio economico, in quanto ogni segnale PAM di ciascun canale viene di fatto inviato singolarmente ad un convertitore ADC che ne esegue la quantizzazione-codifica: dal momento che lo **standard europeo** adottato dai paesi aderenti al CEPT, prevede la **multiplazione simultanea di 30 canali telefonici (+ 2 di segnalazione)**, significherebbe dover implementare 30 convertitori ADC per ottenere il segnale PCM multicanale. Una soluzione più efficiente potrebbe allora essere quella di inviare **ad un solo** convertitore ADC un segnale *già multiplato* che prende il nome di **segnale TDM-PAM**; questo è quello che effettivamente si implementava nei sistemi PCM fino agli anni '70, quando le operazioni di quantizzazione e codifica erano affidate a circuiti impieganti componenti discreti e quindi complessi, costosi e per nulla vantaggiosi. Negli ultimi anni invece, come anticipato nella Parte I, grazie all'impiego massiccio dei circuiti integrati a larga scala e a basso costo che realizzano in pochissimo spazio le funzioni di campionamento, quantizzazione e codifica, si adotta effettivamente il sistema illustrato in *Fig.4*. Da un punto di vista concettuale ritengo però molto utile descrivere ugualmente l'implementazione del sistema PCM mediante la multiplazione TDM-PAM, perché risulta molto più facile da memorizzare (anche visivamente) e **non lede in alcun modo** il principio generale della formazione del segnale PCM multicanale. La figura seguente schematizza quanto appena esposto:

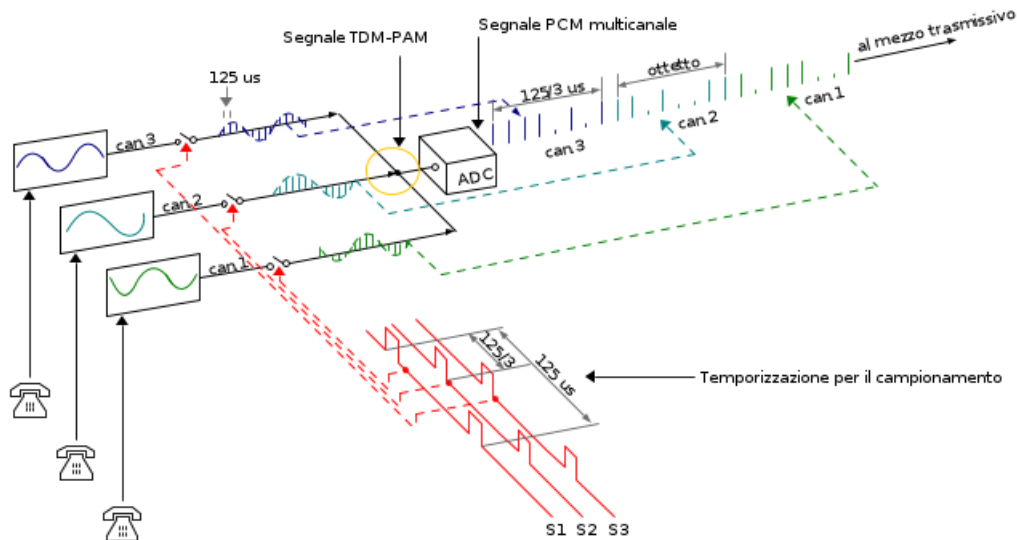


Fig.4 - Vista a blocchi della parte trasmissiva di un sistema PCM elementare con multiplexazione TDM-PAM

In ricezione invece si ha:

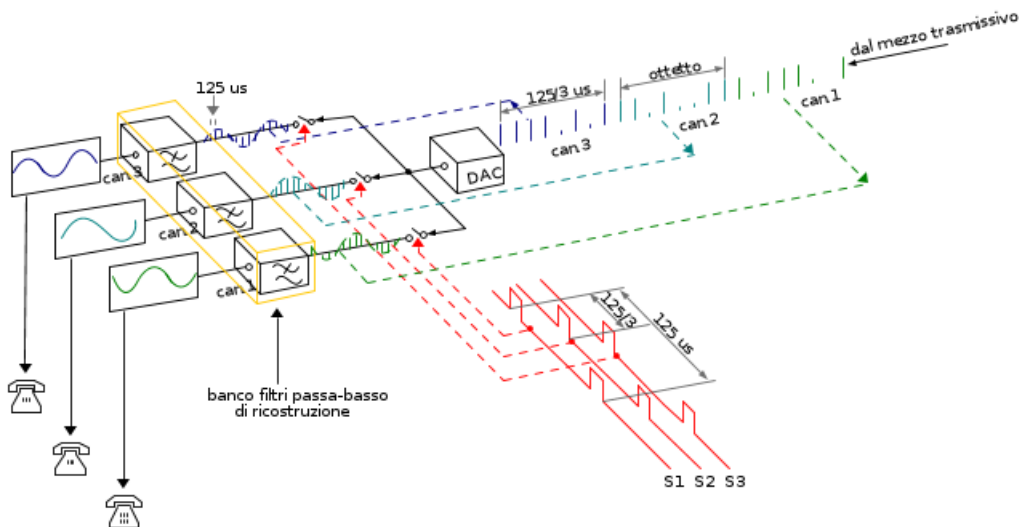


Fig.5 - Vista a blocchi della parte di ricezione di un sistema PCM elementare con (de)multiplexazione TDM-PA.

Come si può vedere dalle precedenti illustrazioni, ogni pacchetto di 8 bit (od ottetto) è **rigidamente allocato** all'interno di un intervallo temporale pari a 125 microsecondi diviso il numero totale di canali implementati (ad esempio 4 in Fig.3 e 3 in Fig.4 e Fig.5); quindi, **quanto tempo è "dedicato"** per ogni **singolo** campione (ogni singola "asticina" colorata nelle ultime due raffigurazioni)? Se indichiamo con α il tempo su ogni campione multiplo e ricordando nuovamente che la normalizzazione europea ha predisposto per gli attuali sistemi PCM la multiplexazione simultanea di 30 canali fonici + 2 di segnalazione, avremo:

$$\alpha = \frac{T_c}{N} = \frac{T_c}{32} = \frac{125 [\mu s]}{32} = 3,9 \mu s$$

Per cui il **tempo che intercorre tra due campioni PAM di messaggi adiacenti è di 3,9 microsecondi** ed è comunemente denominato **intervallo di tempo di canale (IT)**.

Il sistema di temporizzazione campionamento indicato nelle *Fig.4* e *5* adopera quello già esposto nella prima parte: cioè quello "a tenuta". A questo punto è però necessario evidenziare che, oltre al tempo di memorizzazione del campione, vi sono anche i **tempi di carica e di scarica** del condensatore di memoria; tali tempi, pure non essendo teoricamente interessati al processo di successiva quantizzazione-codifica (a cura del convertitore ADC), **NON sono trascurabili** e quindi sono tali da poter **invadere** i tempi destinati alla codifica dei canali adiacenti; più precisamente:

- il tempo di carica del condensatore di memoria per il canale N può invadere il tempo destinato alla codifica del canale N-1;
- la scarica del canale N può invadere il tempo del canale N+1.

In queste condizioni si ha **diafonia**; una piccola parentesi formale a tal proposito: in realtà è più corretto parlare di **interferenza da inter-simbolo I.S.I** o **disturbo da inter-modulazione** piuttosto che di diafonia, nel senso che campioni di un canale si vengono effettivamente a **sovrapporre** a quelli del canale adiacente, generando una potenziale intelligibilità del messaggio nel lato di ricezione. La diafonia vera e propria si riferisce più che ad un fenomeno "numerico" (pur sempre elettrico), ad un fenomeno di **compatibilità (o incompatibilità) elettromagnetica**, derivante da un **accoppiamento non adeguato** esistente tra i conduttori per cause intrinseche o per sopravvenute cause esterne (schermatura non a norma, degrado delle guaine isolanti, fenomeni atmosferici) e tali da **incrementare l'accoppiamento capacitivo** tra i conduttori stessi.

Tralasciando l'aspetto formale, ad ogni modo dobbiamo annullare questo fenomeno: come fare? Adottando praticamente i seguenti accorgimenti:

1. moltiplicare **separatamente** i canali **dispari** e **pari** in due BUS differenti, ciascuno con il proprio condensatore di memoria e poi accedere infine al convertitore ADC (metodo di **multiplazione a due BUS**);
2. fare funzionare il convertitore ADC a **velocità più elevata** di quella prevista (per esempio a velocità doppia) in modo da ottenere un tempo di codifica più breve e contenere così, nel tempo destinato ad ogni canale, la carica, la memorizzazione (e quindi la codifica) e la scarica del campione (metodo di **multiplazione a singolo BUS**).

Il risultato di questi accorgimenti implementativi è quello di avere un codice **più stretto** nel tempo incompatibile con lo standard PCM; allora bisogna progettare, in cascata al convertitore ADC, un blocco "**allargatore**" che *ri-sistemerà* i pacchetti alla giusta frequenza di ripetizione in modo da riottenere il vero segnale PCM multicanale.

L'impiego del **BUS unico** con **quantizzazione-codifica veloce** è in pratica la **scelta ottima** ed è stata adottata dalla maggior parte dei costruttori in quanto riduce eventuali rischi di differenza di comportamento fra canali pari e dispari dovuta a variazioni degli stadi analogici (ad esempio gli amplificatori operazionali o i componenti discreti) prima della codifica:

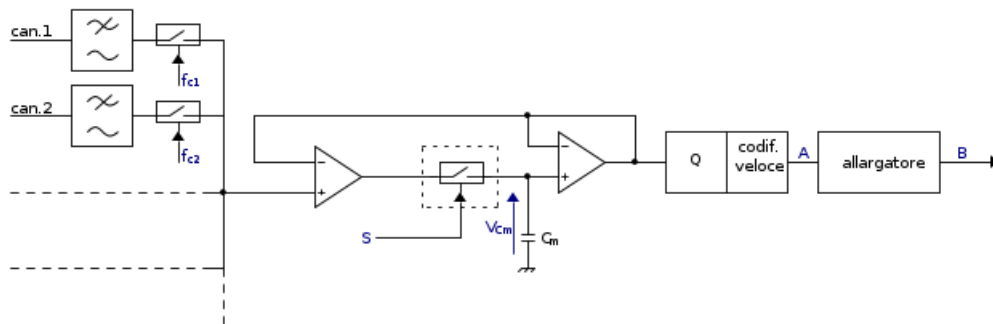


Fig.6 - Multiplexazione TDM-PAM a singolo BUS

E' utile analizzare anche i diagrammi di temporizzazione per capire come opera il blocco allargatore:

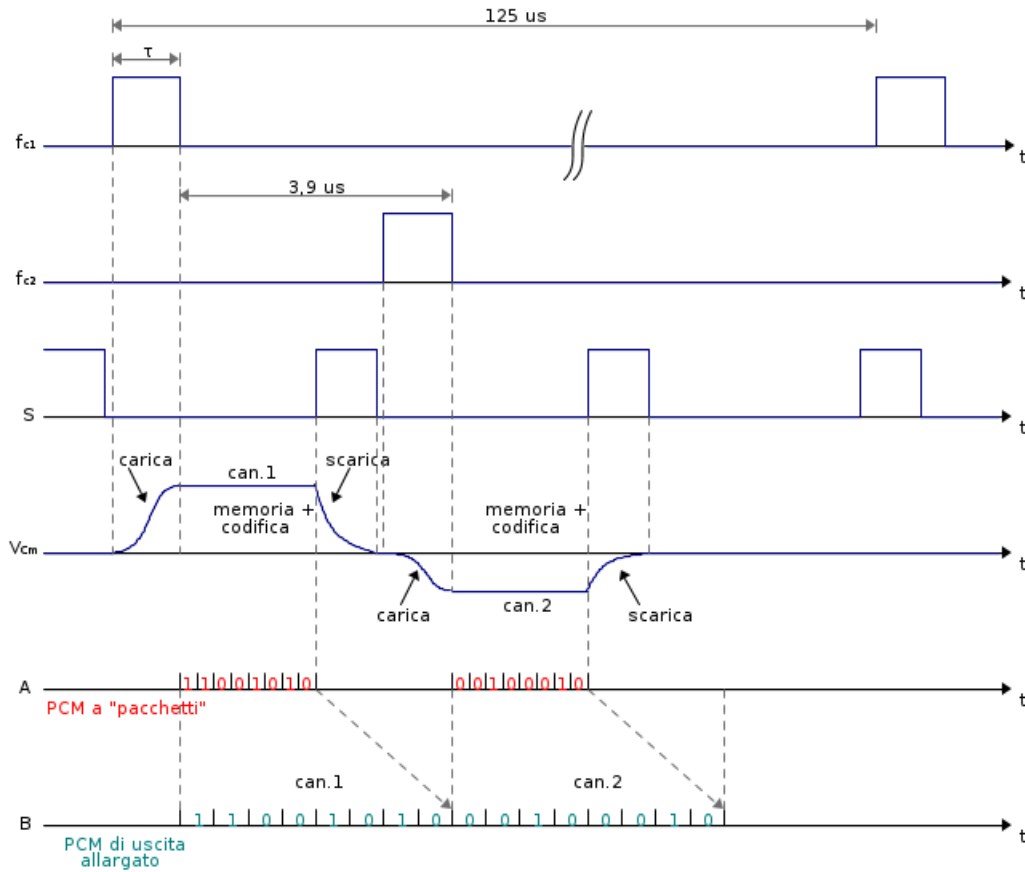


Fig.7 - Multiplazione TDM-PAM a singolo BUS

3 Struttura della trama PCM, segnalazione, allineamento e sincronismo

Per quanto detto fino a questo momento, mediante l'operazione di codifica è possibile far corrispondere per ciascun campione prelevato dal segnale fonico, una sequenza di bit (parola o **byte**) con una capacità di informazione (cioè quanto il sistema è "veloce" nel trasmettere il messaggio informativo) che risulta pari a **64 kbit/s**.

L'intervallo di campionamento pari a **125 μs** rappresenta il **ciclo completo del sistema**, nel senso che in tale tempo devono essere effettuate tutte le operazioni di codifica dei messaggi da multiplare; tale intervallo temporale viene denominato **trama del sistema**.

3.1 Formazione della trama

Nei primi sistemi PCM (e nel sistema americano) la trama era suddivisa in 24 intervalli di uguale durata (5,2 μ s) per i canali fonici, più un tempo di bit per l'allineamento (che tratteremo più avanti).

Nel sistema europeo invece la trama viene divisa in **32 intervalli di durata pari a 3,9 μ s**, di cui **30** si riferiscono a **canali telefonici** (informazione **analogica**) e **2** si riferiscono a **canali di servizio** (informazione **numerica**). Abbiamo anticipato che i singoli intervalli da 3,9 μ s sono comunemente chiamati **time slot** ed indicati con l'abbreviazione **IT**; in particolare:

- i canali telefonici occupano gli intervalli di tempo da **1 a 15** e da **17 a 31**;
- gli intervalli di tempo **IT0** ed **IT16** sono destinati rispettivamente all'invio del **messaggio di allineamento** e delle **segnalazioni di sistema**.

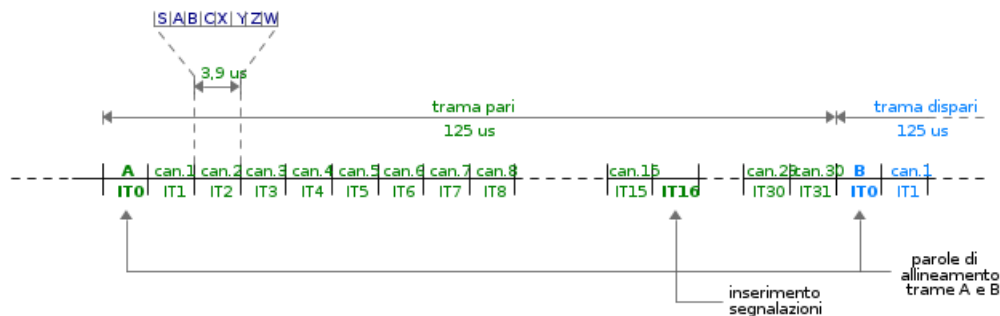


Fig.8 - Struttura di trama di un sistema PCM (a norma CEPT)

Il **numero totale di bit compresi in una trama** risulta essere:

$$8 [\text{bit}] \times 32 = 256 \text{ bit}$$

per cui la **velocità dei bit dell'intero sistema** risulta:

$$V = \frac{256}{125 \times 10^{-6}} = 2048 \text{ Mbit/s}$$

Il **tempo** destinato ad ogni **singolo bit** è quindi pari a:

$$T_{\text{bit}} = \frac{1}{2048 \times 10^6} = 488 \text{ ns}$$

In una organizzazione di trama riveste una importanza fondamentale il **messaggio di allineamento** che il trasmettitore invia al ricevitore in modo tale da dargli una sorta di "**chiave**" per la **corretta redistribuzione** delle informazioni ricevute che altrimenti giungerebbero in modo disordinato.

In particolare, il compito del ricevitore è quello di **riconoscere** sia l'esatto valore del singolo bit in arrivo (ossia leggere correttamente se si tratta di un "1" oppure di uno

"0"), sia di **indirizzarlo nella maniera esatta**, cioè: i bit relativi al primo canale di trasmissione devono essere indirizzati al primo canale di ricezione, i secondi al secondo e così via.

Il ricevitore infatti è **istruito** correttamente a ricostruire la trama perché il messaggio di allineamento gli comunica sostanzialmente: *"Attenzione: dopo di me si presenterà un gruppo di 8 bit il cui codice rappresenterà un campione del canale 1, poi del canale 2, poi del canale 3, poi..."*. Tale messaggio è inviato ciclicamente ogni 125 microsecondi e garantisce che questa operazione avvenga sistematicamente (controllo intensivo di allineamento trama).

Ma questo non basta! Affinché l'operazione di demultiplazione sia effettuata in modo corretto, è indispensabile che i terminali di trasmissione e ricezione **operino alla stessa velocità**: questo concetto va sotto il nome di **sincronismo**. Vediamo dunque il seguente schema:

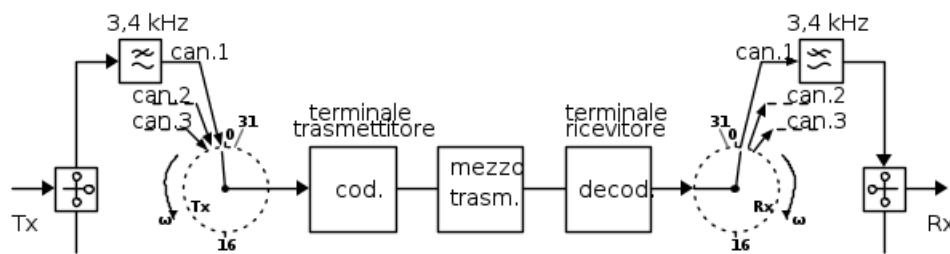


Fig.9 - Allineamento e sincronismo tra Tx ed Rx in un sistema PCM

Il trasmettitore ed il ricevitore sono stati rappresentati come dei commutatori circolari a scatto che girano alla stessa velocità angolare ω compiendo un giro completo in 125 μ e l'intervallo di tempo tra uno scatto ed il successivo è di 3,9 μ s (corrispondente ad un time slot); il messaggio di allineamento fa sì che i due commutatori siano **in fase**, il che è sempre garantito dal ciclico controllo sul messaggio di allineamento.

Il metodo che consente ai commutatori di girare alla stessa velocità consiste nel trasferire l'informazione della velocità dal trasmettitore al ricevitore; ciò in pratica avviene, come si vedrà, tramite gli stessi dati trasmessi.

L'allineamento di trama viene ottenuto tramite l'immissione, in trasmissione nel segnale PCM, di opportuni **caratteri di riconoscimento** e prevedendo appositi circuiti in ricezione capaci di riconoscere i caratteri di allineamento e mantenere l'allineamento tra il terminale trasmettente e quello ricevente.

Per quel che riguarda la lunghezza e la distribuzione dei caratteri di allineamento di trama, si hanno diverse possibilità che naturalmente implicano la realizzazione di circuiti diversamente complessi; fondamentalmente esistono i seguenti sistemi atti a realizzare l'allineamento di trama:

1. metodo ad una cifra di allineamento per ogni trama (**sistema a retroazione**), utilizzato dai primi sistemi italiani e tutt'ora impiegato nel sistema americano (Bell): trasmette un solo carattere di trama, deve essere riconosciuto dal ricevitore e deve essere confermato ad ogni trama. Il mancato riconoscimento di tale carattere provoca nella temporizzazione di ricezione uno **slittamento** pari a ad un tempo di bit (denominato proprio **retroazione sulla temporizzazione**) finché non viene effettivamente riconosciuto il carattere di allineamento;
2. metodo ad un'intera ripartizione di trama esclusivamente riservata all'allineamento (**sistema ad azione diretta**): si trasmette all'inizio di ciascuna trama una configurazione di codice, composta da tanti caratteri quanti sono quelli utilizzati da ciascun canale fonico, che non possa essere incontrata altrove nel treno di impulsi relativo ad un'intera trama, se non con una probabilità esigua. Il circuito di ricezione, una volta riconosciuto questo codice, dà inizio all'operazione di conteggio, per la produzione degli impulsi di temporizzazione e di campionamento, guidando così gli impulsi in arrivo dalla linea alla loro corretta destinazione.
3. metodo ad una ripartizione di trama alternativamente utilizzata per la trasmissione dei caratteri di allineamento di trama e di segnalazione, a suo tempo adottato nella realizzazione di un sistema italiano. e non più in uso.

3.2 Segnalazione e multitrama PCM

Prima di parlare della segnalazione sul sistema PCM è il caso di fare una breve introduzione, in termini generali, sui **sistemi di segnalazione** che possiamo suddividere in due classi fondamentali:

- **segnalazione associata al canale;**
- **segnalazione a canale comune.**

La *segnalazione associata al canale* si ha quando i criteri di segnalazione (**impegno, selezione, conteggio, svincolo**, ecc.) per ciascuna direzione della *giunzione*, vengono realizzati mediante una o più "vie" di sufficiente velocità telegrafica, utilizzata però in modo **individuale** dalla giunzione stessa. Piccola parentesi: la **giunzione** identifica, nella terminologia della *commutazione telefonica* (che vedremo più avanti), un collegamento tra un apparato chiamato **traslatore** ed un altro chiamato *MUX-PCM* (anche questo sarà descritto prossimamente). Per adesso ci interessa sapere che il traslatore effettua un'operazione di **separazione** tra l'informazione di fonia (continua) e di segnalazione (numerica) dal lato della centrale di commutazione e le ricongiunge dal lato giunzione.

Praticamente l'elaborazione del segnale fonico può essere effettuata unitamente all'elaborazione della segnalazione, pertanto fonia e segnalazione si dicono

"**associate**" nello stesso canale di trasmissione.

Si ha invece *segnalazione a canale comune* quando, con l'introduzione delle centrali di commutazione elettroniche, il trattamento della segnalazione e la supervisione della centrale sono elaborati in modo centralizzato ed automatico: nasce pertanto la necessità di scambiare dati "pregiati" fra le varie centrali, contenuti anche le informazioni di commutazione. Tali dati vengono sostanzialmente convogliati su un unico canale a ciò predisposto, detto appunto **canale comune di segnalazione**; nel caso in cui, ad esempio, fra due centrali esista un fascio PCM, tale canale potrà essere costituito da un time slot (IT) disponibile con capacità pari a 64 kbit/s e che normalmente è il 16°. Tratteremo più approfonditamente questo tipo di segnalazione quando parleremo di sistemi di commutazione.

Concentriamoci sulla segnalazione associata al canale (che è **quella adottata a livello europeo**), nel sistema PCM le informazioni della segnalazione sono sì "concentrate" nel sedicesimo time slot (IT16), ma **restano assegnate in modo individuale a ciascun canale**, pertanto si tratta a tutti gli effetti di segnalazione associata al canale. Poiché l'IT16 non porta l'informazione della fonia ma è dedicato all'invio delle informazioni di segnalazione e tenendo conto che ad ogni intervallo di tempo corrispondono 8 bit, risulta evidente come in una sola trama **non sia possibile** esaurire la segnalazione di tutti e 30 i canali fonici.

In particolare, assegnando un bit alla segnalazione di ciascun canale, in una sola trama troverebbero posto le segnalazioni di solo 8 canali: come inglobare allora i restanti 22 canali fonici? Occorrerebbero nella fattispecie 4 trame per esaurire tutti e 30 i canali; quindi dobbiamo discutere in che modo organizzare più trame contemporaneamente.

Da quanto fino ad ora detto si deduce che la segnalazione relativa ad un qualsiasi canale verrebbe aggiornata ogni 4 trame, cioè ogni $125 \mu\text{s} \times 4 = 500 \mu\text{s}$ il che equivale ad una velocità di aggiornamento delle segnalazioni di:

$$V_{refresh} = \frac{1}{500 \times 10^{-6}} = 2 \text{ kbit/s}$$

che risulta oltremodo **eccessiva** poiché i criteri di segnalazione si susseguono ad un ritmo estremamente basso; ad esempio, il *tono di occupato* a tutti noi noto, corrisponde all'invio di un segnale sinusoidale a frequenza di 425 Hz per 0,5 s ed intervallato da pause di altrettanti 0,5 s. Effettuando la lettura della segnalazione ogni 500 μs si ripeterebbe l'acquisizione del criterio di occupato per ben 1000 volte durante i 0,5 s di emissione del suono e 1000 volte durante i restanti 0,5 s di pausa. Quindi uno spreco di risorse considerevole!

In realtà la capacità è stata opportunamente ridotta di **1/4** cioè a **0,5 kbit/s** per ogni bit impiegato, cui corrisponde un tempo di aggiornamento di **2 ms** e nello stesso tempo sono stati dedicati 4 bit di segnalazione per ciascun canale, realizzando così potenzialmente 4 vie di segnalazione, per una capacità di informazione complessiva

di $0,5 \times 4 = 2$ kbit/s; questa può essere quindi efficientemente impiegata ad esempio in sistemi integrati fra trasmissione e commutazione di centrale.

Le vigenti normalizzazioni in ambito CEPT ed ITU-T prevedono quindi la disponibilità per ciascun canale, di **4 bit di segnalazione**, di **capacità informativa pari a 0,5 kbit/s** ciascuno e con **distorsione di 2 millisecondi** (in valore assoluto):

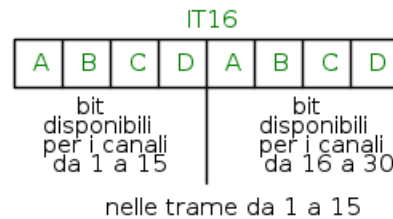


Fig.10 - Utilizzo dei bit dell'IT16 per le segnalazioni

Di tali 4 bit di segnalazione a canale, normalmente ne viene usato uno solo quando è impiegato un sistema di segnalazione ad "**una via per verso**" oppure due per traslatori a "**due vie per verso**".

Da ciò ne consegue una **struttura organizzativa superiore alla trama**, denominata **multitrama**, formata complessivamente da **15 + 1 trame**; infatti i **30 x 4 bit** di segnalazione complessivi si possono distribuire in **15 x (4 x 4) bit** disponibili nell'IT16 di **15 trame consecutive**, tenendo anche conto che è necessaria una **sedicesima trama** all'interno della quale il time slot IT16 contiene l'informazione di allineamento di questa ulteriore struttura temporale. Di seguito è illustrata la multitrama a norma CEPT:

Quanto detto sopra è riassumibile nella seguente tabella, in cui nelle righe sono stati riportati i vari IT16 delle 16 trame interessate e nelle colonne è riportato l'utilizzo degli 8 bit di ciascun IT16 quali segnalazione dei vari canali:

Tab 1 – Utilizzazione del bit dell'IT16 nella struttura di multitrama secondo raccomandazione CETP/ITU-T

trama	bit nel sedicesimo time slot							
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
0	x	x	x	x	x	x	x	x
1	a1	b1	c1	d1	a16	b16	c16	d16
2	a2	b2	c2	d2	a17	b17	c17	d17
3	a3	b3	c3	d3	a18	b18	c18	d18
4	a4	b4	c4	d4	a19	b19	c19	d19
5	a5	b5	c5	d5	a20	b20	c20	d20
6	a6	b6	c6	d6	a21	b21	c21	d21
7	a7	b7	c7	d7	a22	b22	c22	d22
8	a8	b8	c8	d8	a23	b23	c23	d23
9	a9	b9	c9	d9	a24	b24	c24	d24
10	a10	b10	c10	d10	a25	b25	c25	d25
11	a11	b11	c11	d11	a26	b26	c26	d26
12	a12	b12	c12	d12	a27	b27	c27	d27
13	a13	b13	c13	d13	a28	b28	c28	d28
14	a14	b14	c14	d14	a29	b29	c29	d29
15	a15	b15	c15	d15	a30	b30	c30	d30

X = 8 bit dedicati alla Parola di Allineamento di Multitrama

Nota: Se non tutte le vie di segnalazione vengono impiegate, è raccomandato di imporre i rispettivi bit come segue: a=0; b=1; c=0; d=1.

Tab1.png

La normalizzazione italiana prevede apparati con due vie di segnalazione definite:

- via di segnalazione **lenta** (refresh di 2 ms, pari a 16 trame);
- via di segnalazione **veloce** (refresh di 1 ms, pari a 8 trame).

Per ottenere tale risultato, il valore dei bit di segnalazione nell'intervallo 16 della generica trama e la loro dislocazione all'interno della multitrama, deve corrispondere a quanto riportato dalla seguente tabella:

Tab 2 – Tabella delle segnalazioni per traslatori a due vie per verso (lenta e veloce)

A = Via di segnalazione Veloce (T 1 ms)

B = Via di segnalazione Lenta (T 2 ms)

trama	bit nel sedicesimo time slot							
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
0	x	x	x	x	x	x	x	x
1	A1	B1	A8	1	A16	B16	A23	1
2	A2	B2	A9	1	A17	B17	A24	1
3	A3	B3	A10	1	A18	B18	A25	1
4	A4	B4	A11	1	A19	B19	A26	1
5	A5	B5	A12	1	A20	B20	A27	1
6	A6	B6	A13	1	A21	B21	A28	1
7	A7	B7	A14	1	A22	B22	A29	1
8	A8	B8	A15	1	A23	B23	A30	1
9	A9	B9	A1	1	A24	B24	A16	1
10	A10	B10	A2	1	A25	B25	A17	1
11	A11	B11	A3	1	A26	B26	A18	1
12	A12	B12	A4	1	A27	B27	A19	1
13	A13	B13	A5	1	A28	B28	A20	1
14	A14	B14	A6	1	A29	B29	A21	1
15	A15	B15	A7	1	A30	B30	A22	1

X = 8 bit dedicati alla Parola di Allineamento di Multitrama

Tab2.png

Come si legge da entrambe le tabelle, l'intervallo di tempo IT16 della trama T0 non contiene informazioni di segnalazione ma una particolare configurazione di 8 bit, indicata con denominata **Parola di Allineamento di Multitrama**; i primi 4 bit di tale byte rappresentano l'effettivo messaggio di allineamento di multitrama inviato al ricevitore. Se il ricevitore non riconosce tale sequenza pone al livello alto **1** il sesto bit che viene inviato a ritroso dal ricevitore al trasmettitore per indicare un *Fuori Allineamento Multitrama FAM* (che analizzeremo più avanti nella trattazione degli allarmi PCM). Ciascuno dei bit 5, 7 ed 8 può essere impiegato dal gestore del servizio alla velocità di 500 bit/s (quindi 1 bit ogni 2 ms). Tali bit, se non usati, sono tenuti al livello logico 1.

A conferma di quanto detto prima, dalla tabella 2 si deduce che le segnalazioni con la via veloce A si aggiornano ogni 8 trame, cioè ogni millisecondo, con capacità informativa di 1 kbit/s; per la via lenta B l'aggiornamento si ha ogni 16 trame con una capacità informativa di 0,5 kbit/s. Ad esempio, il bit A1 della segnalazione veloce è letto 2 volte nell'ambito della multitrama e precisamente nella trama T1 (bit 1) e nella trama T9 (bit 3); mentre, il bit di segnalazione della via lenta B1 è letto solo nella trama T1 (bit 2).

Per concludere, il metodo delle segnalazioni a due vie per verso lenta e veloce **non è conforme** alle normative dell'ITU-T ed inoltre, non ha dimostrato reali vantaggi nella gestione dei sistemi numerici PCM. Per tali motivi esso non è più implementato nei nuovi impianti PCM che sono, tuttavia, compatibili e interfacciabili con quelli della generazione precedente che utilizzano ancora tale metodo di invio delle segnalazioni.

3.3 Temporizzazione e messaggi di allineamento

Tutte le operazioni di elaborazione del segnale analogico per la sua trasformazione in forma numerica, devono essere eseguite, in un sistema a divisione di tempo come quello PCM, con l'ausilio di particolari impulsi tutti correlati tra di loro e generati dalla stessa sorgente.

Le fasi principali dell'elaborazione del segnale di fonia nella parte di trasmissione di un'apparecchiatura PCM sono, come ben sappiamo, il campionamento e la codifica; ognuna di queste fasi richiede impulsi di pilotaggio di natura diversa, per cui normalmente si devono realizzare due generatori di impulsi separati e denominati rispettivamente:

- **distributore dei tempi di campionamento;**
- **distributore dei tempi di codifica.**

Per l'elaborazione dei comandi di segnalazione è invece necessario un **distributore dei tempi di multitrama** ed infine il tutto deve essere cadenzato da un unico

oscillatore o generatore di clock (orologio).

I generatori appena definiti prendono il nome di **circuiti di temporizzazione**.

E' chiaro che anche nella parte di ricezione le operazioni di decodifica e demultiplazione del segnale vengono eseguite sotto il comando di impulsi forniti da generatori analoghi a quelli di trasmissione; l'unica **differenza** risiede nel fatto che, mentre in trasmissioni tali generatori sono pilotati generalmente da un oscillatore (**a quarzo**), in ricezione il segnale di comando è costituito da un'onda temporizzante ottenuta dal segnale ricevuto attraverso un blocco che prende il nome di **rigeneratore terminale**.

La frequenza dell'oscillatore a quarzo è data dalla relazione seguente:

$$f_r = n \cdot M \cdot 8000$$

dove f_r definisce la *frequenza di ripetizione*, "**n**" il numero di cifre binarie costituente la parola di codice relativa a ciascun canale ed "**M**" è il numero dei canali che debbono essere realizzati, compreso nel caso di allineamento ad *azione diretta* discusso in precedenza, quello relativo al segnale di allineamento di trama e quello per le segnalazioni.

Nel caso di allineamento *a retroazione* la relazione anzidetta si trasforma nella seguente:

$$f_r = (n \cdot M + 1) \cdot 8000$$

vista la necessità di introdurre un bit in più per ogni trama a cui affidare l'informazione di allineamento. Lo schema di massima relativo alla generazione dei comandi di temporizzazione (per la parte Tx del terminale PCM a norma CEPT) è di seguito riportato:

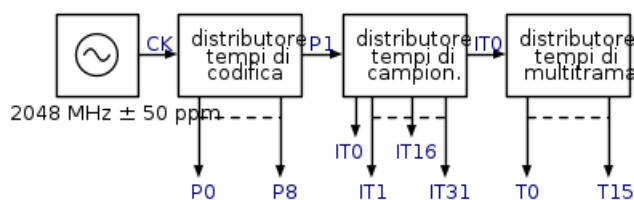


Fig.12 - Schema a blocchi dei circuiti di temporizzazione di un sistema PCM (a norma CEPT)

L'oscillatore fornisce un segnale di periodo pari alla durata di 1 bit; i cicli al secondo del comando **CK** corrispondono ai bit per unità di tempo (bit/s) del segnale PCM e cioè a 2048 MHz con tolleranza stabilita entro 50 parti per milione. La corrispondenza tra i dati trasmessi ed il clock è di seguito illustrata:

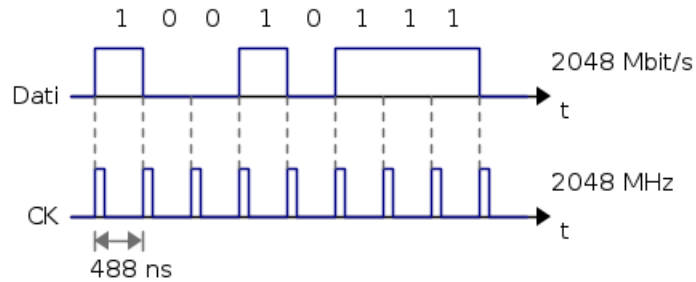


Fig.13 - Cronogrammi dati e clock

Il distributore dei tempi di codifica provvede, elaborando il segnale di clock, a generare i comandi necessari ad effettuare le operazioni di codifica e compressione; tali comandi si ripetono ogni tempo di canali e sono ritardati, ciascuno rispetto al precedente, del tempo di 1 bit.

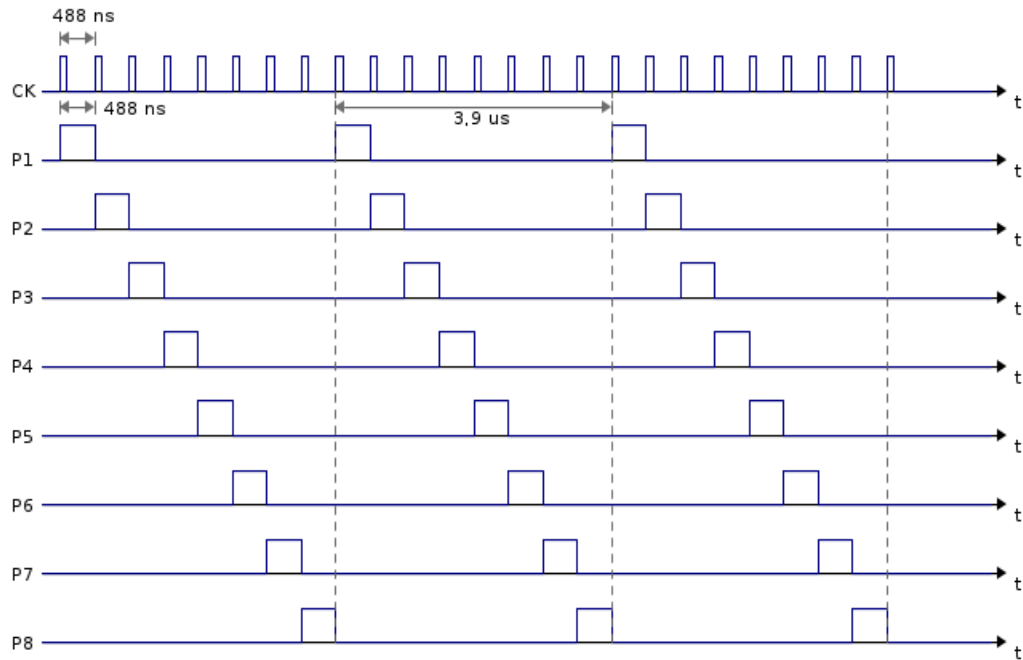


Fig.14 - Temporizzazione comandi di codifica

Il circuito che realizza tali comandi è di fatto un contatore per 8 seguito da un blocco di decodifica:

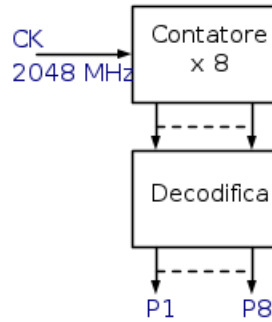


Fig.15 - Distributore dei tempi di codifica

Il distributore dei tempi di campionamento dei canali realizza 32 comandi (IT) di cui 30 (IT1/15 ed IT17/31) sono utilizzati per comandare gli interruttori di canale (da 1 a 30) e 2 (IT0, IT16) per l'invio del messaggio di allineamento e delle segnalazioni; in particolare, i comandi IT si ricavano dai rispetti P(X) tramite un contatore per 32 ed una decodifica ed hanno durata pari a 3,9 μ s. Dai tempi IT1/15 ed IT17/31 vengono ricavati, mediante un processo di **parzializzazione**, i comandi δ 1/15 e δ 17/31 per gli interruttori di canale, i comandi δ (X) hanno durata pari al tempo di campionamento τ . Di seguito lo schema a blocchi della circuiteria implementata:

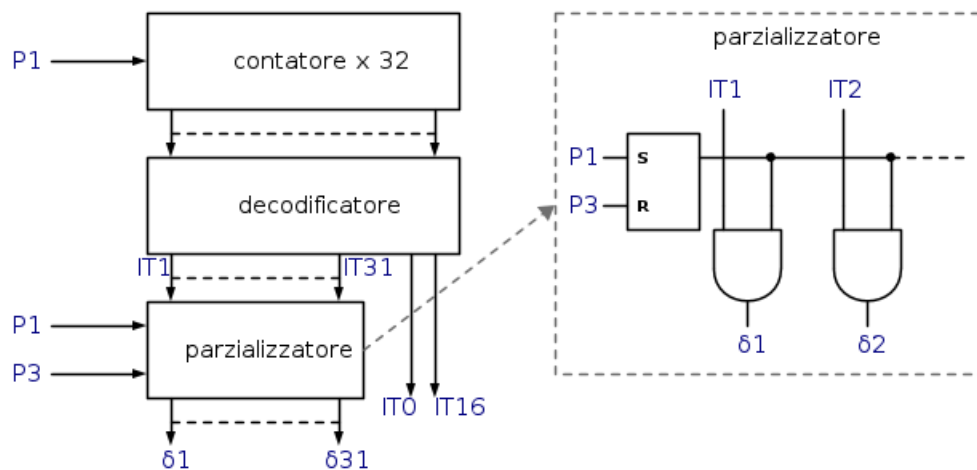


Fig.16 - Distributore dei tempi di campionamento

e i relativi cronogrammi dei comandi:

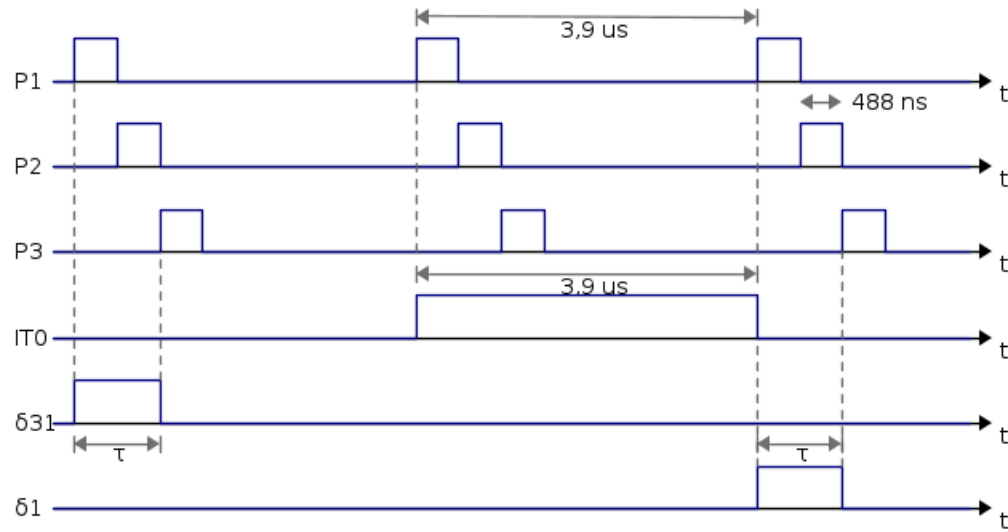


Fig.17 - Temporizzazione comandi di campionamento di canale

Il distributore tempi di multitrama genera, in coincidenza con il time slot IT16, 16 comandi detti **T_n** (con n da 0 a 15) di cui 15 (da T1 a T15) vengono adoperati per l'invio delle segnalazioni ed 1 (il comando T0) per il messaggio di allineamento di multitrama. Il circuito che realizza i comandi T_n è un generatore composto da un contatore per 16 pilotato da un segnale IT e seguito dal solito circuito di decodifica:

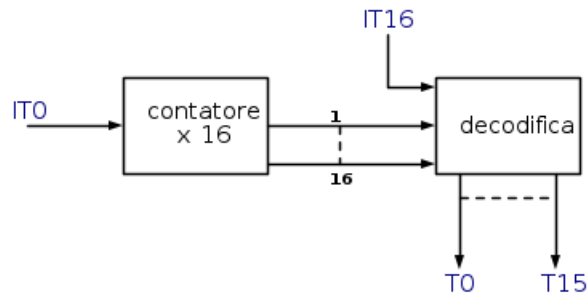


Fig.18 - Distributore tempi di multitrama

Anche i segnali T_n hanno durata di 3,9 μs, il periodo di 2 ms e sono distanziati tra loro di 125 μs come mostra la figura seguente:

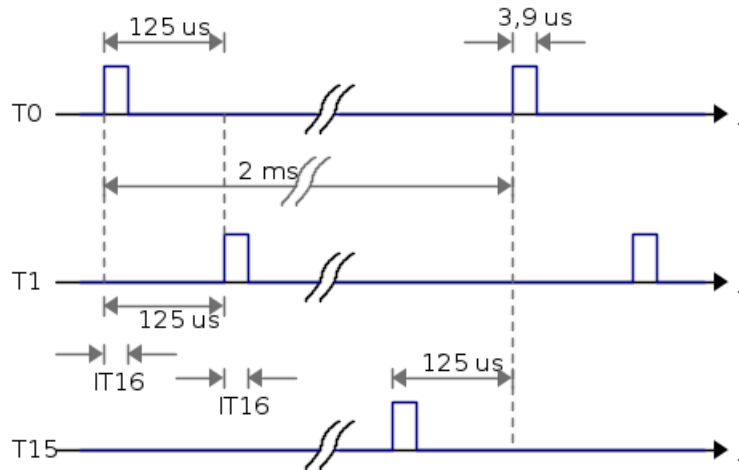


Fig.19 - Temporizzazione di multitrama

Concludiamo il paragrafo parlando della generazione dei messaggi di allineamento. Il **messaggio di allineamento di trama** è una parola di 8 bit inserita nella trama in corrispondenza del time slot IT0. Tale parola, scelta tra quelle **più difficilmente simulabili** nel codice PCM, può avere due configurazioni di seguito elencate:

- **X1 0 0 1 1 0 1 1** parola **A** (di allineamento vera e propria);
- **X1 1 S1 X2 X3 X4 X5 X6** parola **B**.

La parola B viene inserita al fine di evitare delle potenziali simulazioni sia da parte dei criteri di segnalazione che da parte di canali dati; infatti abbiamo detto che i criteri di segnalazione sono **molto lenti** (periodo di 10 ms) **rispetto ai tempi di trama** per cui sarebbe altamente probabile, se non inserissimo la parola B, simulare la parola di allineamento A da parte dei criteri di segnalazione presenti sul time slot IT16 e consecutivi.

Analogamente, un canale usato per dati, dove vengono periodicamente impiegate configurazioni relativamente costanti nel tempo, potrebbe simulare la parola di allineamento. Pertanto, l'**alternarsi delle parole A e B** (nello specifico la A è inserita nelle trame pari, la B in quelle dispari) ed il **controllo** della loro presenza **in ricezione**, assicura **protezione dalle simulazioni** e quindi da eventuali **fuori servizio** non segnalati dall'apparato stesso.

I bit X_n , se non impiegati, sono normalmente settati ad 1 ed il bit S1 contiene un'informazione sullo stato d'allarme del ricevente (come discuteremo più avanti); tali bit hanno una capacità di informazione massima pari a 4 kbit/s. In particolare:

- il bit **X1** delle parole di allineamento A e B viene impiegato, su raccomandazione dell'ITU-T, per effettuare in ricezione un controllo ciclico sul corretto riconoscimento della parola di allineamento stessa. Infatti tale

bit viene inserito come **ridondanza** alle parole di allineamento (nel seguito di questa trattazione vedremo in che modo avviene questo);

- i bit **X2/3/4/5/6** della parola B prendono il nome di **bit liberi** e sono a disposizione per **uso nazionale**.

Queste vie dati sono utilizzabili per i servizi più disparati ma di norma costituiscono delle comode ed economiche **linee T.D. (Trasmissione Dati)** per i servizi interni al gestore della rete: ad esempio in Telecom Italia, questi collegamenti dati sono destinati per connettere internamente tra loro, i vari tornelli per le timbrature dei dipendenti, presenti nelle diverse sedi di lavoro dislocate su tutto il territorio nazionale, con l'Intranet aziendale per la registrazione delle presenze (in gergo prendono il nome di collegamenti "**Giano**"). Con appositi modem dati aventi interfacce TD integrate (ad esempio la V24), queste linee dedicate raggiungono di norma una velocità di trasmissione pari a 1200 bit/s.

Il **messaggio di allineamento di multitrama (W)** è una parola di 8 bit di questo tipo:

W=0 0 0 0 X1 S2 X2 X3

Essa viene inserita in ogni multitrama al tempo T0 (in particolare nell'IT16 della trama 0). I primi 4 bit sono resettati a "0" e costituiscono l'effettivo messaggio di allineamento, il quinto, il settimo e l'ottavo sono settati ad "1" se non usati, mentre il sesto (S2) è utilizzato per l'informazione di allarme a ritroso sullo stato di allineamento di multitrama in ricezione. I tre bit X1/2/3 possono essere messi a disposizione per l'invio di un segnale con massima velocità pari a 500 bit/s per il solito uso nazionale.

Per l'inserzione del messaggio relativo alle segnalazioni è necessario far ricorso alle precedenti tabelle (*Tab.1* e *Tab.2*), a seconda che si voglia realizzare solo vie lente (a norma ITU-T) o vie lente e veloci insieme.

A titolo esemplificativo consideriamo la seguente rete logica che pratica l'inserzione del messaggio relativo alle segnalazioni veloce (A) e lenta (B) del canale 4:

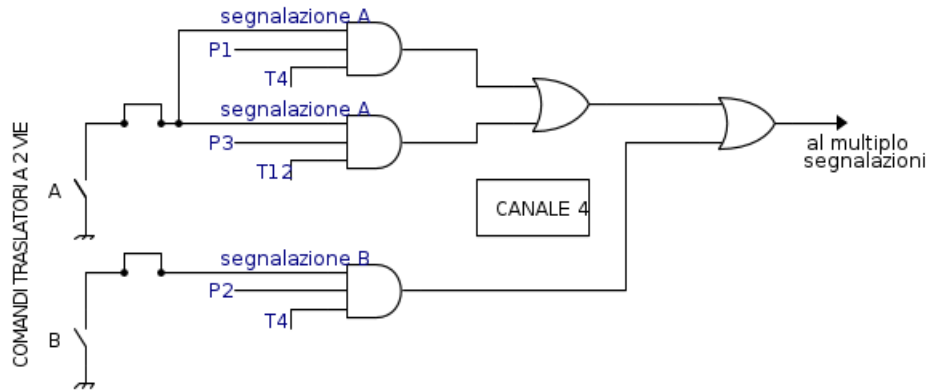


Fig.20 - Campionamento ed inserzione segnalazioni, con A via veloce e B via lenta per il canale

Dalla Tab.2 si vede che la segnalazione di tipo A è inviata nel time slot IT16 dalla trama 4 (tempo di multitrama T4) come 1° bit e nell'IT16 della trama 12 come 3° bit (tempo di multitrama 12); mentre quella di tipo B è inviata una sola volta nella multitrama come 2° bit dell'IT16 della trama 4 (tempo di multitrama T4):

Tab 2 – Tabella delle segnalazioni per traslatori a due vie per verso (lenta e veloce)

A = Via di segnalazione Veloce (T 1 ms)

B = Via di segnalazione Lenta (T 2 ms)

trama	bit nel sedicesimo time slot							
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
0	x	x	x	x	x	x	x	x
1	A1	B1	A8	1	A16	B16	A23	1
2	A2	B2	A9	1	A17	B17	A24	1
3	A3	B3	A10	1	A18	B18	A25	1
4	A4	B4	A11	1	A19	B19	A26	1
5	A5	B5	A12	1	A20	B20	A27	1
6	A6	B6	A13	1	A21	B21	A28	1
7	A7	B7	A14	1	A22	B22	A29	1
8	A8	B8	A15	1	A23	B23	A30	1
9	A9	B9	A1	1	A24	B24	A16	1
10	A10	B10	A2	1	A25	B25	A17	1
11	A11	B11	A3	1	A26	B26	A18	1
12	A12	B12	A4	1	A27	B27	A19	1
13	A13	B13	A5	1	A28	B28	A20	1
14	A14	B14	A6	1	A29	B29	A21	1
15	A15	B15	A7	1	A30	B30	A22	1

X = 8 bit dedicati alla Parola di Allineamento di Multitrama

Tab2A.png

In modo analogo vengono realizzate le segnalazioni degli altri canali; alla fine queste vengono riunite tramite un'operazione di OR logico per la formazione del multiplo delle segnalazioni.

Conformandoci allo standard dell'ITU-T, cioè impiegando due vie lente, lo schema di riferimento è il seguente:

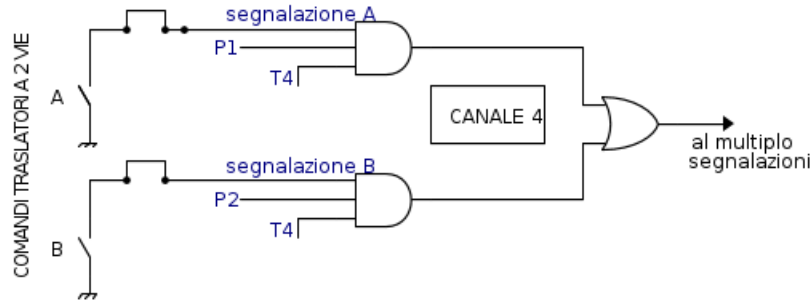


Fig.21 - Campionamento ed inserimento segnalazioni, con A e B vie lente per il canale 4 (a norma ITU-T)

La logica di funzionamento è la stessa a quella vista nel caso di via lenta e veloce simultanee, con la differenza che bisogna fare riferimento alla *Tab.1* per la realizzazione delle segnalazioni; con questo sistema, grazie alla particolare forma dei segnali di trama T1/15 (di durata 3,9 μ s al time slot IT16) sul multiplo delle segnalazioni sono disponibili i bit di segnalazione dei vari canali **già nella forma adatta** per essere inseriti nel flusso PCM assieme ai bit di fonìa.

Conclusioni alla Parte II

Ho ritenuto necessario fermarmi qui per quanto riguarda questa seconda parte, anche se non era previsto in origine, ma mi son reso conto che di carne sul fuoco ce n'è già abbastanza ed il seguito, cioè la **formazione del segnale PCM completo** e la relativa **manipolazione in ricezione**, richiede uno sviluppo altrettanto lungo, il che renderebbe la lettura troppo pesante. Pertanto questi argomenti saranno trattati nella terza parte dove parlerò anche di **gestione e telecontrollo degli allarmi** (peraltro molto attinente al lavoro che svolgo) e spero di introdurre le caratteristiche impiantistiche riguardanti i sistemi di **commutazione telefonica PCM**, attualmente in uso nel nostro paese.

Riferimenti

Formazione specialistica e training on the job presso Telecom Italia S.p.A. (2007-2013).

Estratto da "<http://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Jordan20:la-tecnica-pcm-il-tesoro-nascosto-della-trasmissione-dati-parte-ii>"