

# Appunti di Comunicazioni Elettriche

## Segnali multipli

<i>Introduzione.....</i>	<i>1</i>
<i>Tecnica della divisione di frequenza.....</i>	<i>2</i>
Metodi con cui realizzare un segnale FDM .....	2
<i>Tecnica della divisione di tempo .....</i>	<i>4</i>
Osservazione: caratteristiche statistiche del segnale telefonico multiplo FDM .....	9
Segnali di tipo numerico multiplati a divisione di frequenza .....	10
<i>Caratteristiche richieste al mezzo trasmissivo.....</i>	<i>11</i>
<i>Considerazioni generali sui filtri in ricezione.....</i>	<i>13</i>

## Introduzione

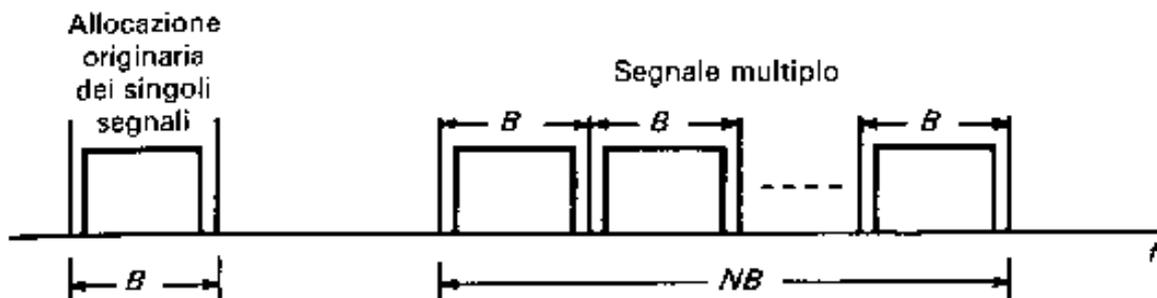
Nella pratica delle **telecomunicazioni** accade spesso di dover inviare, sulla stessa **direttrice di comunicazione**, molti segnali simultanei: tipico è il caso delle conversazioni telefoniche tra numerosi utenti che comunicano a due a due contemporaneamente. In casi come questo si dice che sulla predetta direttrice viene trasmesso un **segnale multiplo**.

Il caso più semplice è quello in cui ad ogni **segnale semplice** (per esempio ad ogni conversazione telefonica) è assegnato un mezzo trasmissivo indipendente, come ad esempio una particolare linea di un cavo con molte linee: in questo caso, il segnale multiplo può dirsi del tipo a divisione di spazio (**SDM**, *space division multiplex*), il che indica appunto che la distinzione tra i singoli segnali avviene spazialmente. Si tratta, d'altra parte, di un tipo estremamente semplice di segnale multiplo, che non aggiunge molto alla nozione di segnale semplice, proprio perché su ogni mezzo trasmissivo passa uno ed un solo segnale. Per questo motivo, la *denominazione di **segnale multiplo** viene generalmente riservata a quei segnali compositi che utilizzano uno stesso mezzo trasmissivo*: ad esempio, è possibile trasmettere più di 10000 segnali telefonici sulla stessa **linea coassiale**. Nel seguito ci riferiremo dunque solo a questo tipo di segnale multiplo.

Quando dobbiamo formare un segnale multiplo, abbiamo un evidente vincolo di fondo da rispettare: dobbiamo essere sempre in grado di riconoscere e separare i singoli segnali componenti. Esistono allora due tecniche fondamentali atte a soddisfare questa condizione, di cui parleremo a partire dal prossimo paragrafo.

## Tecnica della divisione di frequenza

Nella tecnica della **divisione di frequenza (FDM, frequency division multiplexing)**, il segnale multiplo è ottenuto semplicemente allocando i singoli segnali semplici in differenti **intervalli di frequenza**, *modulando* ciascuno di essi con differenti **onde portanti**. La larghezza di banda minima che può essere occupata da ciascun segnale trasposto in frequenza è pari alla larghezza di banda occupata dal segnale originario: questo risultato è ottenuto praticamente usando una **modulazione di ampiezza a banda laterale unica (SSB)**. Il segnale multiplo viene perciò indicato, in questo caso, con la sigla **FDM-SSB**, proprio per indicare la divisione di frequenza e la tecnica con cui è stata ottenuta. Se  $B$  è la banda assegnata al singolo segnale semplice, la banda occupata dal segnale multiplo sarà approssimativamente  $N \cdot B$ , dove  $N$  è il numero di segnali semplici associati. La situazione è illustrata nella figura seguente:



In ricezione, si dovranno predisporre  $N$  **filtri** (oppure un unico **filtro sintonizzabile** a seconda dei casi), ciascuno con banda  $B$ , che dovrà selezionare solo il segnale di interesse, eliminando gli altri.

## Metodi con cui realizzare un segnale FDM

Abbiamo dunque detto che un segnale multiplo FDM è ottenuto allocando i singoli segnali semplici in differenti intervalli di frequenza: questo lo si ottiene facendo in modo che ogni segnale moduli una determinata **portante**. Per  $N$  segnali, ci saranno cioè  $N$  portanti.

A seconda del tipo di modulazione adottata, si ottengono chiaramente segnali multipli con diverse caratteristiche, più o meno favorevoli a seconda delle applicazioni:

- **modulazione di ampiezza**: quando il singolo segnale modula d'ampiezza una portante, ma non viene trasmessa la portante stessa (si realizza cioè una modulazione *AM standard*), lo svantaggio è nella necessità di usare in ricezione un **demodulatore coerente**, mentre il vantaggio è quello di non caricare inutilmente, con la presenza delle portanti, gli amplificatori: infatti, questo ulteriore carico richiederebbe un **comportamento lineare** su un più ampio intervallo di ampiezze, al fine di evitare le **distorsioni armoniche** (di cui si parlerà più avanti) e i conseguenti problemi dovuti all' **intermodulazione**. Non solo, ma se la portante non viene trasmessa, la potenza del segnale modulato diventa proporzionale alla potenza del segnale modulante e quindi, per esempio, non si trasmette niente quando il canale è a riposo: questo reca un ulteriore grosso vantaggio in termini di carico degli amplificatori, specialmente nel caso di segnali caratterizzati da considerevoli pause o, comunque, da notevoli variazioni di potenza, come il segnale telefonico.

Le 3 possibili tecniche di modulazione d'ampiezza sono notoriamente le seguenti:

- **modulazione di ampiezza con banda laterale unica (SSB)**: questa tecnica è quella che minimizza l'occupazione di banda, in quanto ogni segnale modulato occupa una banda pari a quella del segnale modulante; lo svantaggio è invece quello di richiedere una elevata **selettività** dei filtri in ricezione, specie nel caso in cui il segnale modulante abbia un elevato rapporto tra frequenza massima e frequenza minima <sup>(1)</sup> (in questi casi, può essere preferibile un sistema con **banda laterale parzialmente soppressa**);
- **modulazione di ampiezza in doppia banda laterale e portante soppressa (DSB-SC)**: rispetto alla modulazione SSB, in questo caso occupiamo una banda doppia (ogni segnale modulato ha banda pari al doppio della banda del segnale modulante), ma possiamo usare filtri meno selettivi e quindi più semplici; la selettività potrà inoltre essere tanto minore quanto maggiore è la

---

<sup>1</sup> A rigore, un segnale che non contiene la continua è, per definizione, un segnale passa-banda; tuttavia, un segnale passa-banda in cui la frequenza massima è molto maggiore della frequenza minima, si può in prima approssimazione vedere come un segnale passa-basso. Per esempio, consideriamo la differenza che c'è quando bisogna campionare un segnale passa-basso o un segnale passa-banda: nel primo caso, la minima frequenza di campionamento è il doppio della frequenza massima del segnale (che poi coincide con la banda), mentre nel secondo caso è il doppio della banda passante, cioè della differenza tra frequenza massima e frequenza minima; se però la frequenza massima è molto maggiore della minima, allora si considererà una frequenza di campionamento doppia della frequenza massima, intendendo quest'ultima come banda del segnale.

distanza tra le varie portanti. Inoltre, si può anche pensare di trasmettere due segnali **in quadratura**, occupando la stessa banda necessaria a trasmettere uno solo dei due: dato però che questa tecnica è più sensibile al **rumore**, essa è consigliabile solo quando i due segnali modulanti sono di tipo numerico, dato che i segnali di tipo numerico sono più immuni ai disturbi ed alle interferenze;

- **modulazione di ampiezza in doppia banda laterale e portante trasmessa** (AM-standard): in questo caso, abbiamo ancora il problema della occupazione di banda doppia rispetto alla SSB ed abbiamo anche il problema della maggiore potenza da trasmettere, in quanto, anche quando i segnali modulanti sono nulli (si parla di *canali inattivi*), vanno comunque trasmesse le portanti; d'altra parte, il grosso pregio è nella possibilità di effettuare in ricezione una **demodulazione non coerente**, il che semplifica la realizzazione degli apparati riceventi;
- **modulazione angolare**: anche la modulazione angolare (di frequenza o di fase) consente di spostare in frequenza un segnale, modificandone però le caratteristiche; la banda occupata è maggiore rispetto ai casi precedenti e viene trasmessa sempre la stessa potenza, quale che sia la potenza del segnale modulante. Questo tipo di modulazione viene usata più di frequente per la trasmissione di segnali di tipo numerico.

## Tecnica della divisione di tempo

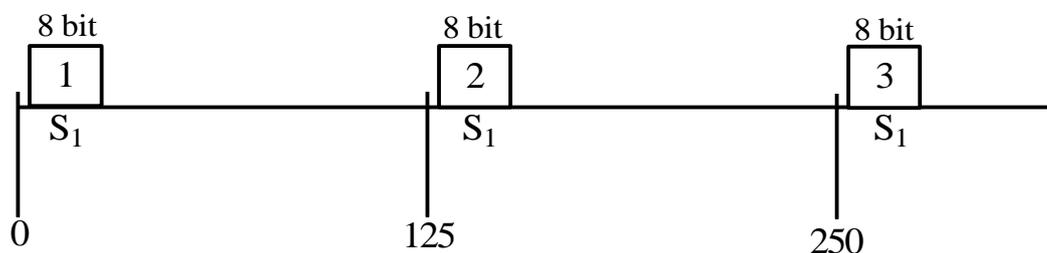
Nella tecnica della **divisione di tempo** (TDM, *time division multiplexing*), l'informazione relativa ai diversi segnali semplici viene inviata in tempi diversi. In pratica, il canale di trasmissione viene messo a disposizione dei singoli canali in successione di tempo.

Per comprendere come funziona questa tecnica, facciamo riferimento ad un caso concreto, che è quello della **trasmissione numerica del segnale telefonico** secondo lo standard **PCM** (*Pulse Code Modulation*). A questo proposito, cominciamo col dire che lo standard PCM prevede, per la trasmissione numerica dei segnali telefonici, una

frequenza di campionamento di 8000 Hz <sup>(2)</sup> ed una **quantizzazione** effettuata con 8 bit. Questi valori indicano, in pratica, che il segnale binario in uscita dal **quantizzatore**, ossia il segnale che deve essere trasmesso (a meno di ulteriori bit di controllo aggiunti dal **codificatore di canale**) attraverso il canale, consiste di 64000 bit emessi al secondo: infatti, una frequenza di 8000 Hz implica che vengano prelevati 8000 campioni al secondo e, se a ciascun campione vengono associati 8 bit, si ha che la “sorgente complessiva”, ossia l’insieme di sorgente-campionatore-quantizzatore, emette un segnale composto da **64000 bit al secondo**.

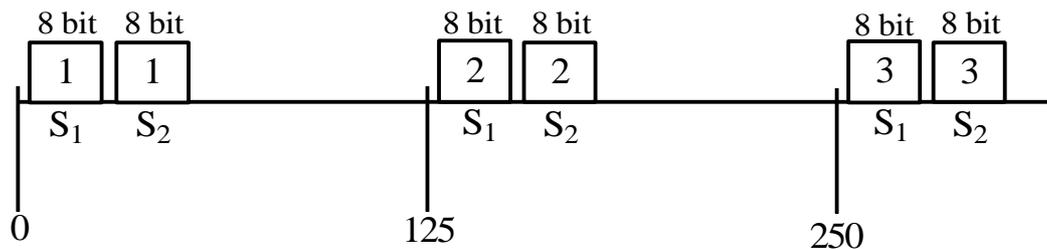
Di conseguenza, il canale usato per la trasmissione del singolo segnale telefonico deve avere una “capacità” di almeno 64000 bit al secondo. Dato che i canali utilizzati consentono di ottenere delle capacità di gran lunga maggiori, è possibile usarli per trasmettere “più conversazioni in parallelo”. Vediamo come.

Se la frequenza di campionamento usata nello standard PCM è di 8000 Hz, il **periodo di campionamento** è di 125  $\mu$ s: questo significa che, una volta prelevato, quantizzato e trasmesso un campione, sono necessari 125  $\mu$ s perché venga prelevato, quantizzato e trasmesso il campione successivo. Quindi, tra l’invio di un campione e l’invio del successivo, il canale risulta “inattivo” per 125  $\mu$ s:

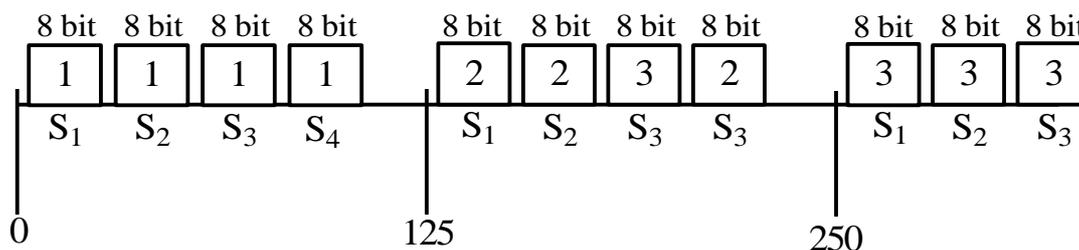


In questo schema, abbiamo rappresentato i tempi di invio del 1° campione, del 2° campione e del 3° campione prelevati dalla generica sorgente  $S_1$ . Risulta allora evidente il tempo durante il quale il canale rimane **inattivo**. Allora, possiamo pensare di impiegare il tempo che intercorre tra il primo e il secondo campione della  $S_1$  per inviare il primo campione di un’altra sorgente, che indichiamo con  $S_2$ ; stesso discorso per l’intervallo di tempo che intercorre tra il secondo ed il terzo campione di  $S_1$  e così via per tutti gli intervalli di tempo:

<sup>2</sup> Questi 8000 Hz per la frequenza di campionamento derivano dall’applicazione del teorema del campionamento: il segnale telefonico (o, meglio, il **segnale vocale di qualità telefonica**) è un segnale con banda compresa tra 300 Hz e 3400 Hz, cioè un segnale praticamente passa-basso (anche se non contiene la continua, vi è comunque abbastanza vicino); allora, in base al teorema del campionamento, per conservare le informazioni contenute nel segnale è sufficiente una frequenza di campionamento di 6800 Hz, pari cioè al doppio della banda occupata. Gli 8000 Hz derivano allora dalla necessità di sovracampionare, cioè di andare ben al di sopra del limite minimo teorico, al fine di prevenire le limitazioni fisiche dei dispositivi utilizzati.



Se poi avanza ancora tempo, possiamo inviare anche i campioni emessi da una terza sorgente e così via, finché il tempo a disposizione non si esaurisce:



In tal modo quindi, riusciamo a trasmettere, contemporaneamente, più di una conversazione, ossia riusciamo ad implementare, su un unico **canale fisico**, più di un **canale logico**.

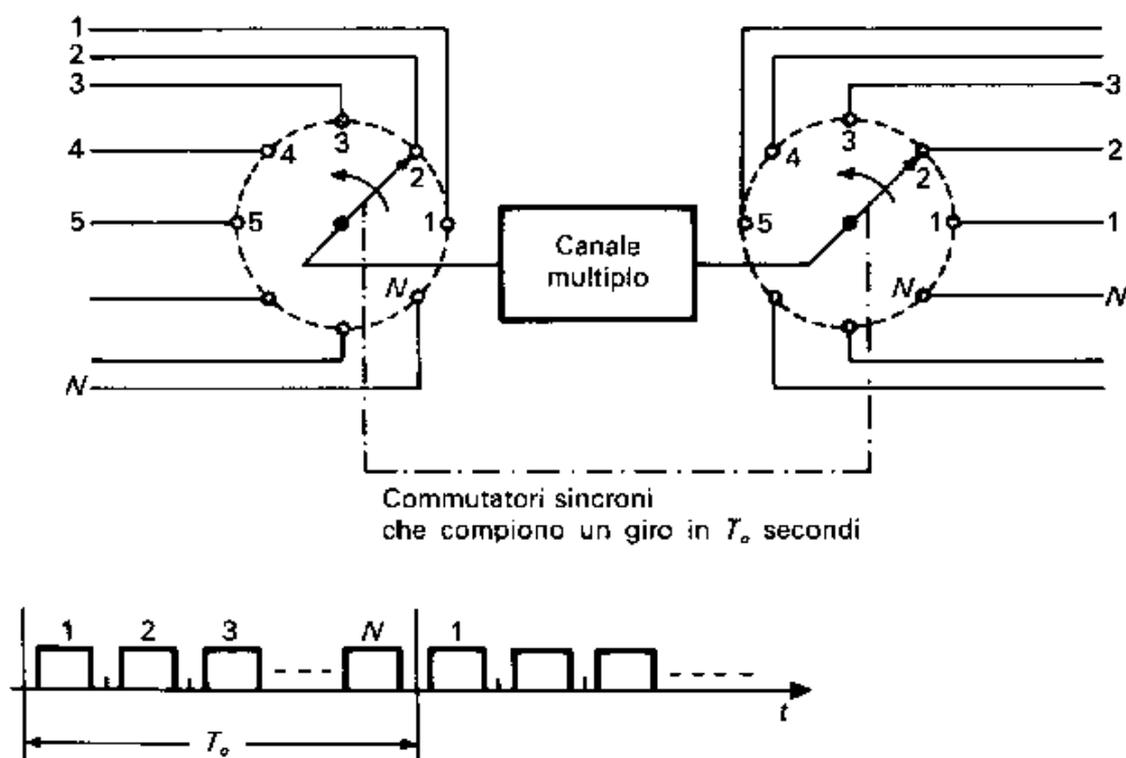
E' subito ovvio che il numero di canali logici che possiamo realizzare con un unico canale fisico dipende dalla **capacità** di tale canale fisico: considerando che ogni canale logico, secondo lo standard, necessita di 64000 bit/secondo, avremo bisogno di un canale fisico di almeno 128000 bit/secondo per realizzare due canali logici, di un canale fisico di almeno 192000 bit/secondo per realizzare 3 canali logici e così via.

A seconda di quanti canali logici realizziamo, si parla di un diverso "**livello**": per esempio, si parla di "**gerarchia del 1° livello**" quando i canali logici realizzati sono 32.

E' bene inoltre sottolineare come non tutti i canali logici sono utilizzati per trasmettere comunicazioni telefoniche, in quanto alcuni di essi vengono utilizzati per **comunicazioni di servizio**, ossia per inviare informazioni necessarie a far funzionare l'apparato di comunicazione; in particolare, ci sono fondamentalmente informazioni necessarie per la "sincronizzazione" degli apparati e scambi di comunicazioni varie tra le varie centrali. Per esempio, nella gerarchia del 1° livello, il canale numero 1 viene usato per la sincronizzazione, mentre il canale 17 viene usato per mettere in comunicazione le varie centrali.

Vengono inoltre trasmesse alcune oscillazioni sinusoidali, con livello accuratamente stabilizzato, dette **frequenze pilota**: queste oscillazioni servono sia per la regolazione ed il controllo del sistema di trasmissione, sia anche per misurare il livello relativo di un certo segnale multiplo in quei punti dove tale misura interessa (per questa operazione, il segnale telefonico non va bene, in quanto esso ha un livello variabile al variare del parlatore).

Dobbiamo adesso capire come si possa realizzare uno schema di trasmissione di questo tipo. Lo si fa secondo lo schema della figura seguente:



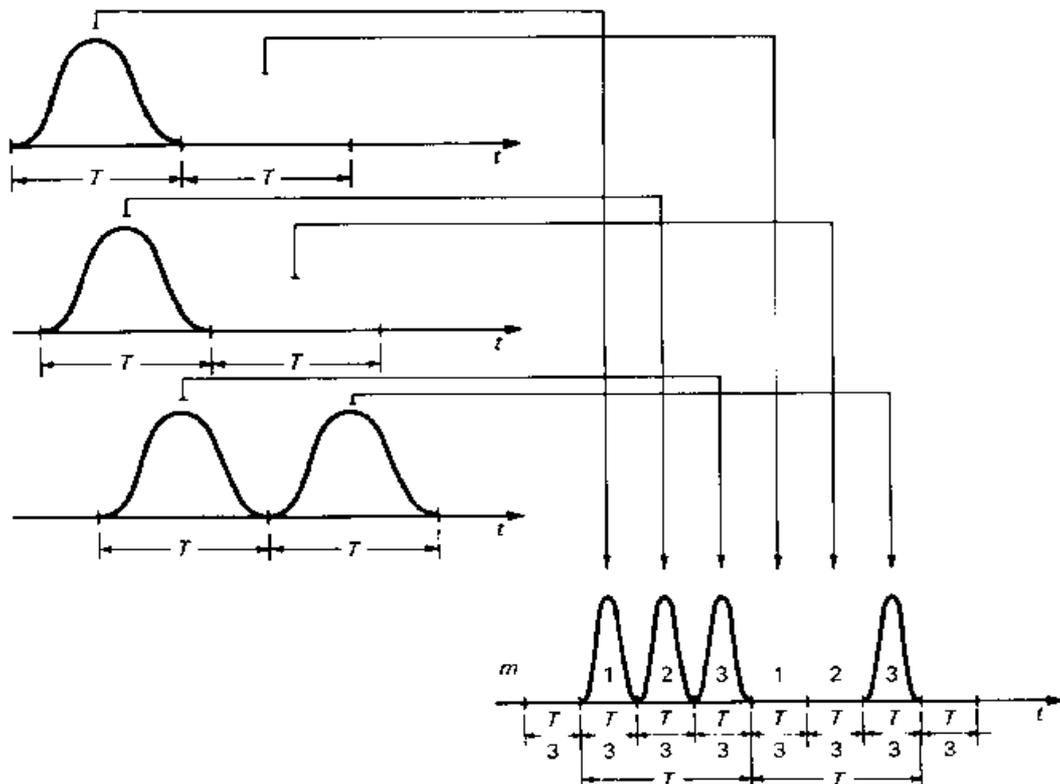
A sinistra ci sono le **N sorgenti** (per esempio N utenti che stanno telefonando) che inviano le proprie informazioni verso il mezzo trasmissivo (indicato con la dicitura **canale multiplo**). Tale mezzo trasmissivo, tramite un apposito **commutatore sincrono**, viene reso disponibile, per ciascun canale, non in modo continuativo, ma solo in intervalli di tempo discreti, equispaziati tra loro di un tempo pari a  $T_0/N$ , dove  $T_0$  è il tempo necessario al commutatore per compiere un intero giro. In pratica, quindi, il commutatore campiona le informazioni di ciascun canale con un periodo di campionamento pari a  $T_0/N$ .

E' ovvio, allora, che il meccanismo funziona senza inconvenienti solo se i segnali singoli sono temporalmente discontinui, rappresentati cioè da una successione di

simboli temporalmente distinti: in caso contrario, si perderebbero tutte le informazioni che il singolo segnale trasporta mentre il commutatore si sta dedicando agli altri segnali. Il caso più semplice è ovviamente quello, descritto prima, della **trasmissione numerica**: in questo caso, ogni segnale singolo è costituito dagli impulsi rappresentativi dei bit, per cui si tratta di segnali tutti con la stessa frequenza di cifra. Se i singoli segnali sono di tipo numerico, si può pensare sia di prelevare un bit per volta da ognuno di essi, sia anche gruppi di bit per volta, nel caso in cui la frequenza di cifra sia molto maggiore della frequenza con cui il commutatore rende disponibile il canale per ciascun segnale.

Se i singoli segnali sono invece tempo-continui, allora vanno necessariamente campionati e in qualche modo è il commutatore stesso che fa da campionatore: dopo di esso, andrà quindi predisposto un opportuno sistema che operi la quantizzazione dei campioni e la successiva trasmissione sul mezzo trasmissivo unico.

A questo punto, dobbiamo capire quanto sia estesa la banda necessaria a trasmettere un segnale TDM comprendente  $N$  segnali semplici: si può dimostrare che la banda minima richiesta è la stessa richiesta da un segnale di tipo FDM, cioè è pari ad  $N$  volte la banda  $B$  dei singoli segnali. Una giustificazione intuitiva di questo è rappresentata nella figura seguente, riferita al caso di un segnale multiplo TDM (indicato con  $m$ ) composto da  $N=3$  canali:



Il generico segnale numerico singolo di partenza è formato da impulsi di durata  $T$ : data l'azione del commutatore, nel segnale TDM il tempo riservato a ciascun impulso è diviso per  $N$  rispetto al tempo  $T$ , per cui ciascun impulso dura adesso un tempo  $T/N$ . Si è cioè ottenuto un nuovo segnale di tipo numerico, dove però il tempo di ripetizione degli impulsi è diventato  $T/N$ . La corrispondente banda occupata sarà allora  $N$  volte la banda del segnale di partenza, ossia appunto  $B \cdot N$ .

Questo quando i singoli segnali componenti sono già numerici. Se invece si tratta di segnali tempo-continui, bisogna per prima cosa campionarli: se  $B$  è la banda occupata dal generico di questi segnali, la minima frequenza di campionamento sarà  $2 \cdot B$ , il che significa che avremo  $2 \cdot B$  campioni al secondo per ogni segnali. Moltiplicando questi campioni, si ottiene un segnale TDM che prevede  $2 \cdot N \cdot B$  campioni al secondo: allora, la banda minima necessaria, per non avere interferenza tra i vari campioni, è ancora una volta  $N \cdot B$ .

Abbiamo dunque visto che è basilare il funzionamento del **commutatore**, che consente la separazione di ciascun canale dagli altri, in quanto effettua un "prelievo" temporale dei campioni relativi a ciascun canale. Lo stesso commutatore deve essere presente in ricezione, dove si comporterà nello stesso modo: esso deve prelevare un campione per volta dal segnale TDM che riceve dal mezzo trasmissivo e deve inviare ogni campione al corrispondente **ricevitore**. E' ovvio, quindi, che i due commutatori in trasmissione ed in ricezione devono essere perfettamente **sincroni**, in modo che ogni ricevitore riceva solo i campioni che gli competono. Data la criticità della sincronizzazione, nel segnale multiplo trasmesso viene inserito un apposito **segnale di sincronismo di trama**: esso comunica all'apparecchiatura ricevente dove è stata convenzionalmente fissata l'origine dei tempi in trasmissione, a partire dalla quale è quindi possibile effettuare la numerazione dei canali  $1, 2, 3, \dots, N$ .

## **Osservazione: caratteristiche statistiche del segnale telefonico multiplo FDM**

Un **segnale telefonico multiplo** realizzato con tecnica FDM è, in pratica, un segnale dato dalla somma di tanti segnali statisticamente indipendenti tra di loro. Allora, invocando il famoso *teorema del limite centrale*, la distribuzione statistica delle ampiezze del segnale, per un grande numero di canali multiplexati, tende ad essere di tipo **gaussiano**. Possiamo perciò interpretare un segnale telefonico multiplo FDM con grande numero di canali come un **rumore termico** (quindi con

distribuzione gaussiana delle ampiezze), con densità spettrale di potenza costante in una banda pari a quella del segnale composito .

Questo consente di fare i calcoli su un sistema di questo tipo: all'uscita del mezzo trasmissivo si può assumere che arrivi un segnale con densità spettrale di potenza  $h_S(f)$  che è quella di un rumore gaussiano equivalente ed al quale si sovrapporrà un rumore in ricezione (comprensivo del rumore fornito dal mezzo trasmissivo e da quello fornito dalla successiva apparecchiatura ricevente) con densità spettrale di potenza  $h_N(f)$ . Il rapporto segnale-rumore all'ingresso dell'apparato ricevente è dunque

$$\left. \frac{S}{N} \right|_{IN} = \frac{h_S(f)}{h_N(f)} \cong \frac{kT_{eq,S}}{FkT_{eq,N}}$$

dove abbiamo supposto che le due densità spettrali siano praticamente costanti su tutta la banda considerata (il che non necessariamente è vero, almeno per  $h_S(f)$ , dato che la banda occupata potrebbe essere particolarmente ampia), dove il **fattore di rumore F** tiene conto della rumorosità dell'apparato di ricezione (ricordiamo che  $h_N(f)$  è il rumore dell'apparato riportato però a monte dell'apparato stesso, da cui appunto la necessità di considerare il fattore di rumore) e dove  $T_{eq,S}$  e  $T_{eq,N}$  sono le **temperature equivalenti di rumore**, la prima da calcolarsi e la seconda che si può ritenere pari alla temperatura ambiente di 293°K.

## Segnali di tipo numerico multiplati a divisione di frequenza

I segnali soggetti a **multiplazione** con divisione di frequenza non sono solo quelli analogici, ma anche quelli di tipo numerico. In questo caso, ci sono notevoli differenze.

In primo luogo, bisogna affrontare la scelta della **modulazione** da adottare per allocare in frequenza in vari spettri: bisogna ricordarsi che i segnali numerici sono molto sensibili alle **distorsioni di fase**, per cui non si può pensare, come nel caso analogico con modulazione SSB, di usare in ricezione una oscillazione locale non coerente con la portante.

Inoltre, i segnali numerici presentano molto spesso uno spettro che comincia da frequenza zero, nel qual caso il sistema SSB non è utilizzabile, in quanto non si possono realizzare filtri che separino perfettamente la banda laterale superiore da quella inferiore. In questi casi, è necessario o modificare opportunamente lo spettro

del segnale numerico elementare <sup>(3)</sup> o ricorrere almeno ad una modulazione di tipo VSB.

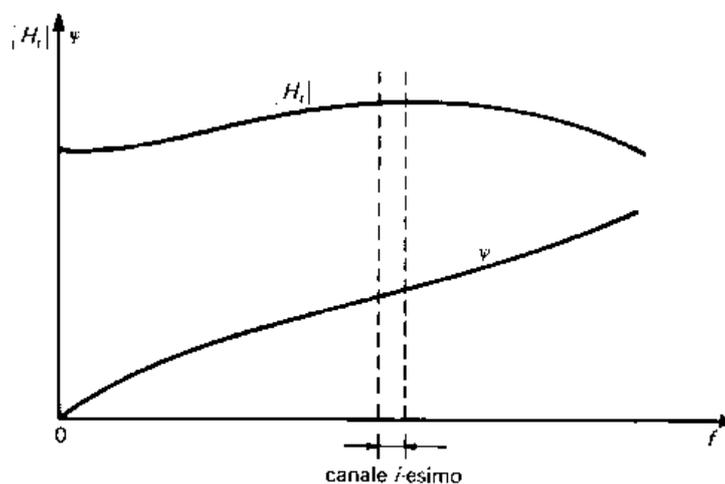
D'altra parte, i segnali numerici sono più resistenti ai **disturbi**, per cui i problemi dell'*intermodulazione* sono meno gravi.

Un tipico segnale numerico multiplo FDM si ottiene quando si trasmettono più **segnali telegrafici** (che sono segnali numerici) in un unico canale telefonico: in questo caso, si adotta una **modulazione digitale di frequenza**, che è particolarmente vantaggiosa per la sua semplicità.

## Caratteristiche richieste al mezzo trasmissivo

Per quanto riguarda i requisiti sulle caratteristiche del mezzo trasmissivo, il segnale TDM ed il segnale FDM hanno proprietà notevolmente diverse.

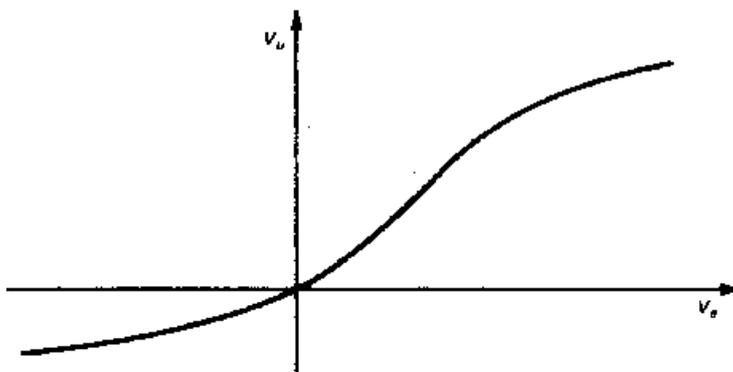
Nel caso del segnale FDM, **distorsioni di ampiezza e di fase** producono degli effetti che possono essere valutati separatamente per ciascun canale componente, in funzione evidentemente della porzione della caratteristica di ampiezza e della porzione della caratteristica di fase che cadono entro la banda del segnale considerato:



Nel caso semplice in cui le caratteristiche del mezzo varino così lentamente con la frequenza da potersi ritenere che in ciascun canale l'ampiezza sia costante e la fase lineare, l'effetto delle distorsioni predette è minimo, in quanto provoca

<sup>3</sup> Ricordiamo che un segnale numerico non è altro che una sequenza di segnali elementari, uguali tra loro ma moltiplicati per un coefficiente che porta di fatto l'informazione binaria: ad esempio, nel caso di una codifica ortogonale, il segnale elementare è un rettangolo e viene moltiplicato per un coefficiente +1 o 0 a seconda che si voglia trasmettere l'1 logico o lo 0 logico; nella codifica antipodale, invece, si usa ancora il rettangolo, ma i coefficienti sono +1 e -1.

semplicemente una differenza di livello (**distorsione di ampiezza**) ed una differenza di ritardo (**distorsione di fase**) tra i vari canali. Più problemi ci sono invece, sempre per un segnale FDM, per eventuali **distorsioni armoniche**, dovute ad esempio ad una *caratteristica di trasferimento* del tipo seguente:



Queste **non linearità** producono **frequenze spurie** (da cui appunto il termine di **distorsione armonica**), che determinano **interferenza** tra vari canali: infatti, una frequenza che inizialmente apparteneva ad un certo canale, passa attraverso la non linearità e viene spostata su un altro canale, dando appunto interferenza tra i due.

Nel caso del segnale TDM, invece, la situazione è in un certo senso complementare. Ad esempio, le distorsioni armoniche appena considerate producono conseguenze che possono essere valutate separatamente per ciascun canale: infatti, la non linearità del sistema agisce in successione sui singoli segnali, modificandone l'ampiezza in modo non lineare. Al contrario, le distorsioni di ampiezza e di fase producono deformazioni dei segnali trasmessi, per esempio producendo delle code di un canale che cadono in corrispondenza dei tempi riservati ad altri canali: si generano in questo caso delle interferenze, che poi non sono altro, con riferimento alla trasmissione numerica, che delle **interferenze intersimbolo**.

E' bene fare anche una osservazione a proposito di un segnale FDM: se questo segnale comprende un numero elevato di segnali singoli e la banda di tali segnali è ampia, la banda occupata sul mezzo trasmissivo è a sua volta piuttosto ampia, il che fa sì che le caratteristiche del mezzo differiscano anche notevolmente dai segnali in bassa frequenza a quelli in alta frequenza. Per evitare che ci sia una differenza eccessiva, spesso si fa in modo che il segnale FDM complessivo non inizi ad una frequenza molto bassa, in modo che il rapporto tra la massima frequenza e la minima frequenza non sia troppo elevato.

Il segnale FDM ebbe in passato una applicazione molto maggiore del segnale TDM, principalmente perché le operazioni più delicate venivano effettuate, per il sistema FDM, da **filtri**, ossia da dispositivi realizzabili essenzialmente con elementi passivi. Questo consentiva di ottenere una alta affidabilità, un piccolo ingombro e un basso consumo. Quando poi sono comparsi i **transistors** e successivamente i **circuiti integrati**, la situazione è profondamente cambiata, per cui i sistemi TDM sono diventati sempre più numerosi, dato anche il contemporaneo e rapido progresso delle tecniche di elaborazione numerica dei segnali e quindi della trasmissione numerica.

## Considerazioni generali sui filtri in ricezione

Abbiamo ormai capito che un componente fondamentale di un qualsiasi sistema di trasmissione è il **filtro**, il quale, a prescindere da dove si trova (trasmissione o ricezione), deve presentare caratteristiche di buona selettività. Facciamo allora una serie di considerazioni qualitative sulla realizzazione concreta dei filtri.

In primo luogo, un filtro costituito da un **doppio bipolo reattivo** chiuso su resistenze ha, a parità di attenuazione desiderata nella **banda attenuata**, una complicazione (ossia un numero di componenti) tanto maggiore quanto più l'intervallo di transizione tra **banda passante** e banda attenuata è piccolo rispetto alla banda passante; in altre parole, non conta l'intervallo di transizione in sé, quanto il suddetto intervallo confrontato con la banda passante.

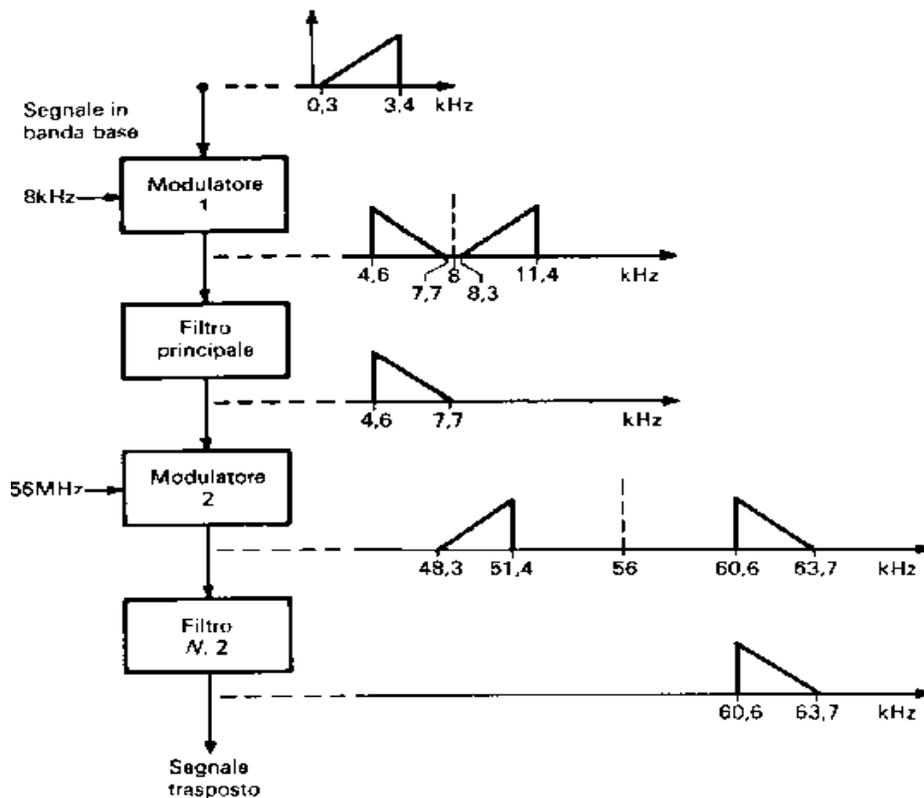
Inoltre, a parità di filtro, quanto più elevata è la **frequenza centrale** della banda passante, tanto più stabili devono essere i vari componenti, in modo che le variazioni dei loro parametri siano percentualmente piccole.

Ancora, le **perdite** inevitabilmente associate agli elementi reattivi producono degli effetti maggiori in quei filtri con intervallo di transizione piccolo rispetto alla banda passante. Inoltre, al variare della frequenza centrale, l'effetto delle perdite si manterrebbe costante se il **fattore di qualità** degli induttori ( $Q_L = \omega L / R$ ) e dei condensatori ( $Q_C = \omega RC = \omega C / G$ ) si mantenesse proporzionale alla frequenza. Nella pratica, invece, ciò non accade, in quanto i parametri R, L e C variano anch'essi con la frequenza: si riscontra che, oltre una certa frequenza di lavoro, il fattore di qualità non è costante, mentre lo è il cosiddetto **fattore di perdita**, che vale  $R/L$  per un induttore e  $G/C$  per un condensatore.

Per questa serie di motivi, i filtri sono spesso realizzati usando non tanto risonatori elettrici (circuiti RLC parallelo o, meno di frequente, RLC serie), ma

**risonatori di tipo meccanico**, con i quali è più facile ottenere la stabilità e le basse perdite richieste. L'accoppiamento elettromeccanico necessario in queste applicazioni è ottenuto sfruttando tipicamente il fenomeno della **piezoelettricità**: lo sfruttamento di questo fenomeno ha portato all'attuazione di **filtri a quarzo**, che usano appunto **risonatori a quarzo** al posto dei risonatori elettrici, con connessioni elettriche tra i vari risonatori e l'aggiunta di opportuni induttori per consentire l'attuabilità dei filtri per le bande richieste.

Nel caso in cui si usino invece **filtri elettrici** (si tratta, in generale, di doppi bipoli reattivi chiusi su resistenze, come un LC parallelo con resistenza di carico), gli inconvenienti di cui abbiamo parlato prima si possono superare con metodi cosiddetti a **doppia modulazione**. Consideriamo ad esempio un segnale modulante di tipo telefonico, cioè con frequenze tra 300 Hz e 3.4 kHz:



In questo schema, il segnale modulante entra in un primo modulatore, che effettua una modulazione DSB-SC con una portante ad 8 kHz; il segnale di uscita occupa quindi una banda di 6.8 kHz ( $= 2 \cdot 3.4$  kHz) centrata sugli 8 kHz. Il successivo filtro (indicato come *filtro principale*) è quello che deve possedere la selettività maggiore, in quanto deve filtrare una delle due bande laterali (nel caso considerato, esso filtra la banda laterale superiore). Il segnale così ottenuto è dunque

un segnale SSB che va però ancora traslato in frequenza, il che si ottiene con una successiva modulazione DSB-SC, usando questa volta una portante a 56 kHz. Il segnale così ottenuto presenta una notevole spaziatura tra le due bande laterali, per cui il filtro che deve eliminare una delle due (quella inferiore nel caso considerato) può presentare una selettività senz'altro minore rispetto al filtro precedente.

Con questo schema, abbiamo cioè ottenuto una modulazione SSB con due successive modulazioni e due filtraggi, di cui però il primo molto selettivo ed il secondo molto meno.

**Autore: Sandro Petrizzelli**

e-mail: [sandry@iol.it](mailto:sandry@iol.it)

sito personale: <http://users.iol.it/sandry>

succursale: <http://digilander.iol.it/sandry1>