

Multiplazione a divisione di frequenza (FDM)



PAROLE CHIAVE ►

1. La trasmissione di segnali multipli

Nelle telecomunicazioni diventa sempre più urgente trovare modalità per inviare numerosi segnali sullo stesso canale, sia per ottimizzare le capacità ed i costi dei sistemi di comunicazione che per venire incontro alla necessità attuali di trasmettere nuovi segnali su canali già esistenti.

Le tecniche che permettono di trasmettere numerose informazioni condividendo lo stesso canale sono le **multiplazioni**.

Le tecniche principali negli attuali sistemi di comunicazione sono di seguito sintetizzate.

Multiplazione a
divisione di
frequenza (FDM)

► La **multiplazione a divisione di frequenza (FDM, Frequency Division Multiplexing)**: i segnali sono modulati con portanti di diversa frequenza in modo da essere traslati su intervalli di frequenze adiacenti; è la tecnica più antica ed è utilizzata soprattutto per segnali analogici.

Multiplazione a
divisione di tempo
(TDM)

► La **multiplazione a divisione di tempo (TDM, Time Division Multiplexing)**: i segnali sono campionati ed ogni campione del singolo segnale viene trasmesso in istanti diversi in modo da non sovrapporsi temporalmente con i campioni degli altri segnali: è la tecnica utilizzata in tutte le trasmissioni digitali.

Multiplazione a
divisione di codice
(CDM)

► La **multiplazione a divisione di codice (CDM, Code Division Multiplexing)**: i segnali codificati in bit vengono moltiplicati per codici ("ortogonali" tra loro) in modo che ogni segnale informativo è distribuito su un intervallo di frequenza ampio (*spread spectrum*) e si ha una sovrapposizione di spettri. In ricezione solo chi possiede il singolo codice "originale" può, attraverso una nuova moltiplicazione ricostruire, la singola informazione mentre gli altri segnali appaiono solo come rumore di fondo di ampiezza ridotta e tale da non disturbare la ricezione: è la tecnica più attuale, utilizzata per la trasmissione UMTS e Wireless dove si devono condividere canali di banda limitata per numerosi utenti.

Nei sistemi moderni per sfruttare al meglio il canale si utilizzano tutte le 3 multiplazioni contemporaneamente in modo da potere inviare un ampio numero di segnali ad alta velocità.

2. La moltiplicazione a divisione di frequenza (FDM)

Segnale tributario
e frequenza
vettrice

La moltiplicazione di frequenza, come detto, trasla ogni segnale a frequenze diverse. Ciò viene realizzato mediante il processo di modulazione, utilizzando per ogni segnale, detto **segnale tributario**, una portante di diversa frequenza, detta **frequenza vettrice**.

La modulazione può essere sia d'ampiezza che angolare. Nel caso in cui si vuole mantenere ridotta la banda, si utilizza la modulazione AM-SSB dove ogni traslazione non modifica né banda né spettro del tributario. Nel caso invece di trasmissioni radiofoniche, dove si vuole mantenere una buona immunità rispetto ai disturbi, si preferiscono le modulazioni angolari di frequenza o di fase anche se il dispendio di banda per ogni tributario è maggiore. Lo spettro di un segnale moltiplo in frequenza è mostrato in figura 1.

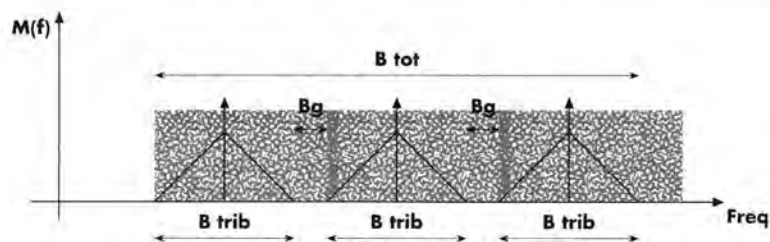


Figura 1

Spettro di segnale moltiplo FDM.

Banda di guardia

Per ridurre le interferenze, ciascun segnale è separato dall'adiacente da un intervallo di frequenza, chiamato **banda di guardia**. È quindi possibile ricavare la banda totale B_{tot} occupata da un segnale moltiplo FDM:

$$B_{tot} = N_{trib} \cdot B_{trib} + (N_{trib} - 1) \cdot B_g$$

1

Dove N_{trib} è il numero di tributari moltipati, B_{trib} la banda traslata (modulata) occupata da ciascun tributario dopo il processo di modulazione e B_g la banda di guardia che separa ogni segnale moltiplo.

Per evitare sovrapposizione tra i tributari, questi vengono limitati in banda base mediante filtri passa-basso prima del modulatore e dopo il demodulatore. In banda traslata invece i segnali sono tenuti separati mediante filtri passa-banda centrati nell'intorno di ciascuna frequenza vettrice.

Moltiplicazione a
tecnica diretta

Il metodo sopra descritto è denominato **tecnica diretta** ed è mostrato in figura 2 per un segnale telefonico moltiplo con modulazione AM-SSB.

Nel caso dei sistemi telefonici la separazione dei tributari è ottenuta riservando a ciascuno di essi una banda lorda di 4 kHz: sapendo che ogni segnale fonico, secondo gli standard internazionali definiti dal CCITT, ha frequenze comprese tra 300 e 3400 Hz si hanno 2 diverse bande di guardia per ogni tributario: quella inferiore di 300 Hz e quella superiore di 600 Hz.

Il sistema a modulazione diretta, sebbene semplice dal punto di vista concettuale, non viene utilizzato in pratica perché richiede un'alta precisione dei filtri e soprattutto delle portanti di trasmissione e di ricezione. All'aumentare del numero dei tributari, l'aumento di filtri e di frequenze vettrici comporta un aumento della complessità degli apparati e quindi dei costi, che rende inadeguato l'utilizzo di tale tecnica.

Moltiplicazione
gerarchica

La moltiplicazione viene perciò realizzata mediante **sistemi gerarchici** dove più segnali vengono moltipati insieme per formare un segnale moltiplo detto **gruppo primario**, successivamente più gruppi primari vengono moltipati tra loro ottenendo un nuovo

segnale multiplo detto **gruppo secondario** contenente tutti i tributari originari. In seguito si procede a cascata con multiplazione di gruppi secondari per ottenere **gruppi terziari** e poi ancora **gruppi quaternari**.

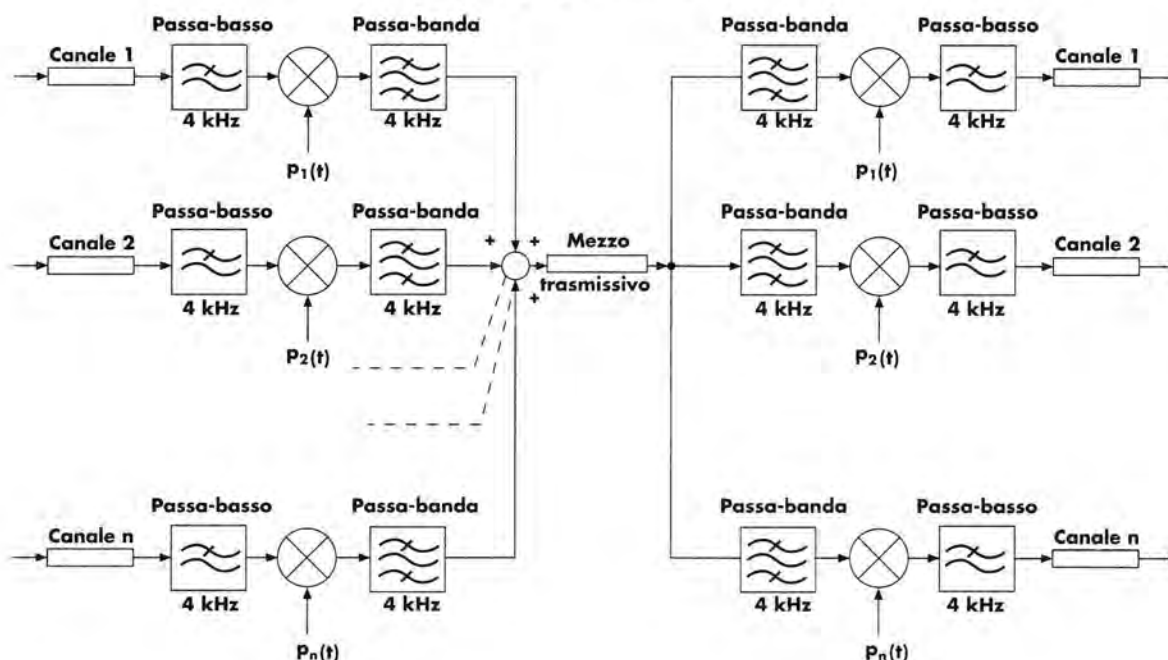


Figura 2

Sistema di modulazione diretta per trasmissione FDM.

Un parametro fondamentale per il buon esito della multiplazione è la precisione in frequenza degli oscillatori che generano le frequenze vettrici, un degrado di tale precisione comporta sia l'imprecisa ricezione di ciascun tributario sia il rischio di sovrapposizione degli spettri adiacenti con interferenza tra i segnali multiplati. Per tali motivi i sistemi FDM hanno un riferimento dato da un oscillatore di elevata precisione (con livelli di spostamento della frequenza inferiore a 10^{-10}) chiamato **oscillatore master**, dalla cui frequenza, mediante tecniche di sintesi di frequenza, si ricavano tutte le altre.

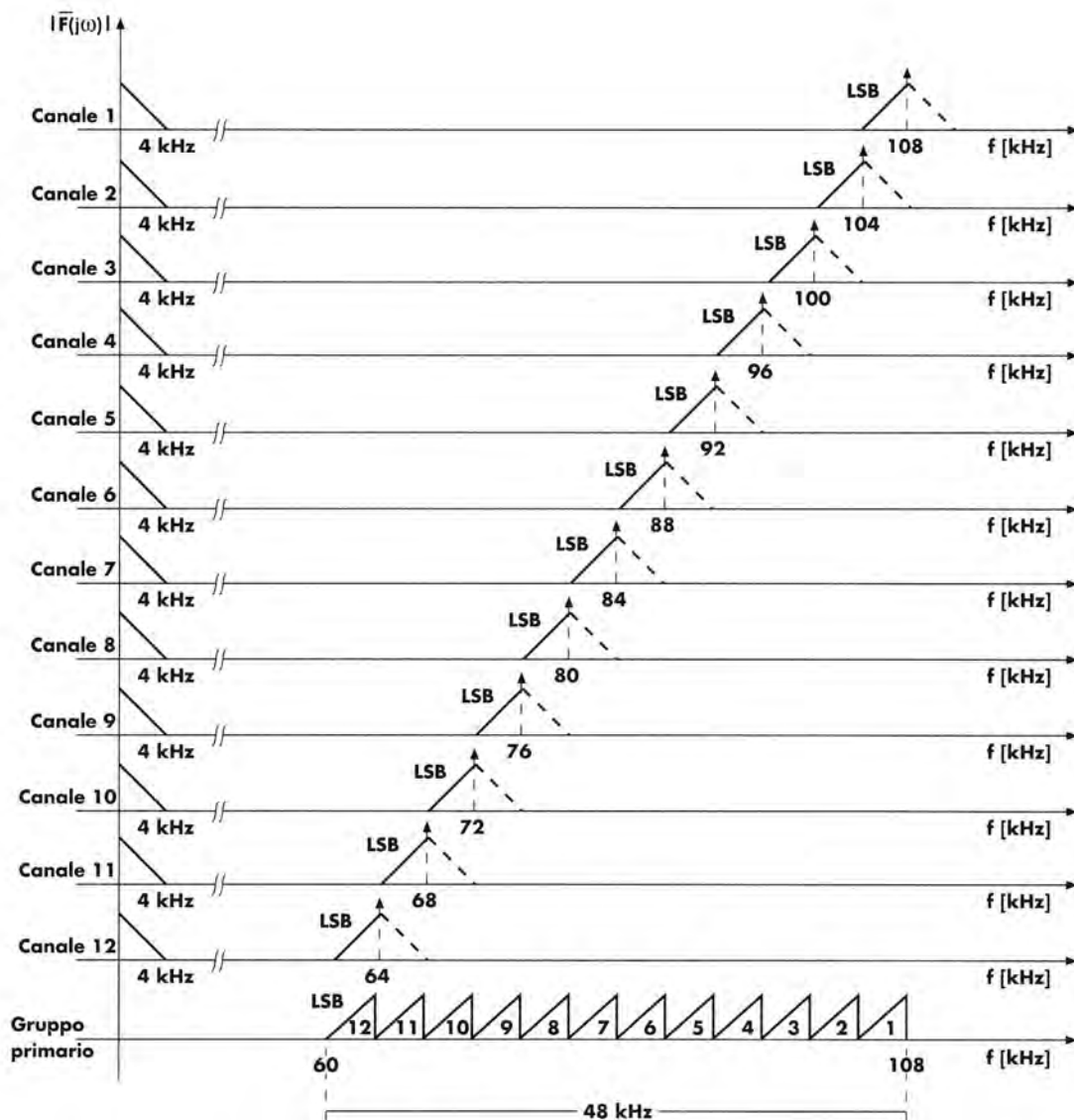
Inoltre, in aggiunta al segnale dei tributari vengono anche trasmesse frequenze di riferimento dette **toni pilota** che permettono ai circuiti di ricezione di agganciare i valori esatti delle frequenze vettrici con le quali si sono multiplati i tributari e permetterne quindi la demodulazione coerente.

3. La gerarchia del sistema FDM telefonico

Secondo gli standard definiti a livello internazionale dal CCITT, i segnali telefonici vengono multiplati in maniera gerarchica, tramite sistemi posti in cascata tra loro.

Il primo livello forma il gruppo primario multiplando 12 tributari (di banda lorda 4 kHz) modulati in SSB con 12 frequenze vettrici per ottenere un segnale multiplo che, posizionato in frequenza da 60 a 108 kHz, occupa una banda di 48 kHz ($=12 \cdot 4$ kHz). La collocazione delle frequenze vettrici e della banda SSB è illustrata in figura 3.

Per unire un segnale contenente un numero maggiore di tributari si multiplano tra loro 5 gruppi primari con 5 frequenze vettrici, ottenendo un gruppo secondario posizionato in frequenza da 312 a 552 kHz, la cui banda di 240 kHz è data dalla somma delle 5 bande di 48 kHz di ogni gruppo primario.


Figura 3

Formazione del gruppo primario nel sistema FDM fonico.

Proseguendo con la struttura gerarchica, si multiplano 5 gruppi secondari separati tra loro da una banda di guardia di 8 kHz per ottenere un gruppo terziario posizionato in frequenza da 812 a 2044 kHz. La banda di tale gruppo, applicando la **1**, è di:

$$B_{tot} = 5 \cdot 240 \text{ kHz} + 4 \cdot 8 \text{ kHz} = 1232 \text{ kHz}$$

2

Infine, si ottiene il segnale multiplato di ordine più elevato, il gruppo quaternario, modulando 3 gruppi terziari separati tra loro da una banda di guardia di 88 kHz. Il segnale così ottenuto occupa le frequenze da 8516 kHz a 12388 kHz. La banda totale del segnale multiplato si calcola ancora applicando la **1**:

$$B_{tot} = 3 \cdot 1232 \text{ kHz} + 2 \cdot 88 \text{ kHz} = 3872 \text{ kHz}$$

3

Quindi al termine della gerarchia di multiplexing si ottiene un unico segnale che contiene ben 900 segnali telefonici separati tra loro mediante la divisione degli intervalli di frequenza.

In tabella 1 si riportano i dati riepilogativi del sistema gerarchico FDM fonico.

Tabella 1
Gerarchia FDM fonica
secondo lo standard
CCITT.

Gruppo gerarchico	N° tributari	Banda di guardia	Banda occupata	Intervallo di frequenze	N° canali fonici
Primario	12	–	48 kHz	60-108 kHz	12
Secondario	5	–	240 kHz	312-552 kHz	60
Terziario	5	8 kHz	1232 kHz	60-108 kHz	300
Quaternario	3	88 kHz	3872 kHz	8516-12388 kHz	900

Dall'analisi del sistema gerarchico risulta evidente che tale modalità riduce enormemente il numero di filtri ed oscillatori da utilizzare rispetto al caso di modulazione diretta.

Il limite di tale standard è il mancato utilizzo di tutta la banda disponibile, infatti nel canale rimane inutilizzata la banda inferiore a 8516 kHz. Per queste ragioni in ambito nazionale vengono formati altri gruppi di 900 o di 960 canali fonici che occupano anche le bande inferiori.

Oltre al segnale informativo gli apparati devono anche scambiarsi messaggi di segnalazione. Anche in questo caso vengono definite delle modalità standard che prevedono varie possibilità: segnalazioni permanenti mediante invio di segnali a frequenza fissa negli intervalli della banda di guardia (ad esempio alla frequenza di 3825 Hz per il singolo tributario fonico) o segnalazioni temporanee con segnali multifrequenza, sovrapposti al segnale fonico, inviate solo in caso di bisogno di segnalazione e non in concomitanza con il segnale informativo.

4. Segnali multipli FDM radio

Multiplazione
nella trasmissione
radiofonica FM

Un altro sistema nel quale diversi segnali condividono lo stesso canale mediante multiplazione FDM è il sistema radiofonico dove ogni stazione radio emette un segnale modulato con una frequenza portante di valore diverso da quella delle altre emittenti.

Per la trasmissione radiofonica FM in Italia ogni segnale (monofonico) ha una banda compresa tra 50 Hz e 15 kHz, la massima deviazione di picco di frequenza Δf_{0MAX} è fissata a 75 kHz (quindi con un indice di modulazione per l'armonica maggiore $\beta = 5$).

Applicando la formula di Carson si ottiene una banda di 180 kHz per ciascun segnale radiofonico modulato, ogni portante (frequenza vettrice) deve essere separata di 200 kHz, quindi si ricava che tra i vari tributari è prevista una banda di guardia di 20 kHz.

Sapendo che la banda disponibile per la trasmissione radiofonica è tra 88 e 108 MHz, è possibile ricavare quanti segnali multipli possono condividere il canale radio senza interferenze:

$$N_{trib} = \frac{B_{tot}}{(B_{trib} + B_g)} = \frac{20 \cdot 10^6}{(200 \cdot 10^3)} = 100 \quad \mathbf{4}$$

Multiplazione in
frequenza nel
sistema GSM

Un'altra applicazione attuale di multiplazione in frequenza è quella utilizzata nei sistemi di telefonia mobile.

Nel sistema GSM europeo le diverse portanti, che modulano il segnale irradiato dal telefono cellulare, sono separate di 200 kHz (tale valore comprende sia la banda occupata da ciascun tributario modulato sia la banda di guardia tra i segnali adiacenti), avendo a disposizione un canale radiofonico compreso tra 890 e 915 MHz per l'**uplink** (la comunicazione dal telefono mobile alla stazione base) e da 935 a 960

MHz per il **downlink** (la comunicazione dalla stazione base al telefono mobile), si ricava che il numero di canali che possono occupare contemporaneamente lo stesso canale radio è di:

$$N_{trib} = \frac{B_{tot}}{(B_{trib} + B_g)} = \frac{25 \cdot 10^6}{(200 \cdot 10^3)} = 125 \quad \mathbf{5}$$

In realtà il primo canale è utilizzato come canale di guardia di protezione dalle interferenze dei segnali di frequenze inferiori, inoltre ogni tributario mediante la tecnica di multiplazione a divisione di tempo è ulteriormente condiviso da 8 segnali per cui il numero totale di utenti che possono comunicare contemporaneamente è di $124 \cdot 8 = 992$.

Ad essa va poi aggiunta l'estensione di banda DCS (la cosiddetta Dual Band) intorno a 1800 MHz che aumenta notevolmente il numero di canali disponibili.

Un maggiore approfondimento di queste tecniche di multiplazione sarà esposto nella sezione 15B, dedicata alla telefonia mobile.