

SISTEMI DI TRASMISSIONE MULTIPLATI A DIVISIONE DI FREQUENZA (FDM)

4

Prerequisiti

- Funzionamento del modulatore bilanciato.
- Funzionamento del multiplexer analogico.
- Concetti fondamentali sulla rappresentazione spettrale.

Obiettivi

- *Conoscenze:* Tipi di sistemi FDM e loro problematiche.
- *Competenze:* Riconoscere la gerarchia dei sistemi FDM e le loro tecniche di modulazione.

La moltiplicazione a divisione di frequenza o FDM (*Frequency Division Multiplexing*) è una tecnica, a banda traslata, utilizzata per trasmettere molteplici messaggi (informazioni) simultaneamente su un unico circuito trasmissivo, tramite appositi dispositivi.

Tali dispositivi vengono chiamati *multiplexer* (vedi par. 2.2, unità 2, vol. I).

Il tipo di modulazione utilizzata per questa tecnica è di ampiezza e precisamente la SSB, poiché è l'unica tecnica avente una limitata occupazione di banda del segnale modulato, adattabile alle caratteristiche della banda vocale (fig. 4.1). Siccome la FDM non può utilizzare pienamente l'intera banda di frequenza, perché sono necessari dei gap tra le sottobande, la capacità complessiva ottenibile è limitata.

multiplexer

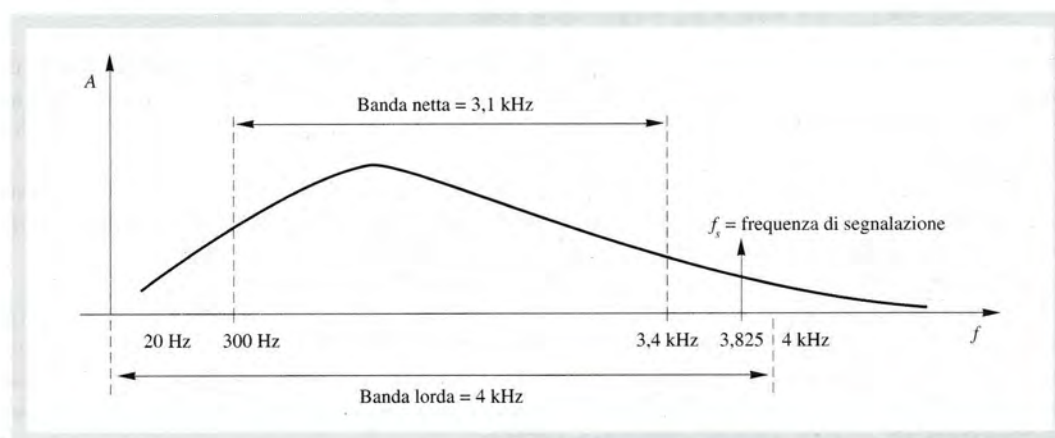


Fig. 4.1
Spettro
di un segnale
vocale.

La FDM non si presta per i sistemi di trasmissione dati, perché poco adatta al colloquio tra due computer a causa della limitata velocità dei sottocanali.

I multiplexer FDM svolgono al loro interno funzioni di mo-demodulazione e pertanto richiedono la presenza dei modulatori e demodulatori. Inoltre, offrono la possibilità di utilizzare le linee telefoniche per le normali comunicazioni contemporaneamente anche per la trasmissione dati a bassa velocità.

4.1 Principio della tecnica FDM

Il multiplexaggio delle varie comunicazioni può avvenire in due diversi modi:

- a modulazione diretta;
- a doppia modulazione.

Il principio di base per entrambe le tecniche è indicato in **fig. 4.2**.

Si considerino N conversazioni contemporanee da trasmettere, cioè N segnali vocali semplici, chiamati *segnali tributari*, ciascuno avente una banda lorda di 4 kHz; per la modulazione degli N segnali tributari sono richieste altrettante portanti o frequenze vettrici diverse tra loro e distanziate di un intervallo di frequenza pari alla massima frequenza della banda fonica (4 kHz).

Le frequenze vettrici (F_1, F_2, \dots, F_N) possono essere generate da un dispositivo chiamato *sintetizzatore di frequenza* (vedi par. 4.5).

Il tipo di modulazione utilizzata è la SSB, che implica l'impiego di modulatori bilanciati e di filtri di banda in grado di eliminare la banda laterale inferiore oppure quella superiore dello spettro del segnale attorno alla frequenza vettrice (portante).

Riferendoci alla disposizione degli spettri di **fig. 4.2** le nuove bande dopo la traslazione sono:

$$\begin{array}{lcl} (F_1 + 0) \text{ kHz} & \div & (F_1 + 4) \text{ kHz} \\ (F_2 + 0) \text{ kHz} & \div & (F_2 + 4) \text{ kHz} \\ \dots\dots\dots & & \dots\dots\dots \\ (F_N + 0) \text{ kHz} & \div & (F_N + 4) \text{ kHz} \end{array}$$

con F_1, F_2, \dots, F_N che rispettano le seguenti condizioni:

$$\begin{array}{l} F_1 > 4 \text{ kHz} \\ F_2 = F_1 + 4 \text{ kHz} \\ F_3 = F_2 + 4 \text{ kHz} = F_1 + 8 \text{ kHz} \\ \dots\dots\dots \\ F_N = F_{N-1} + 4 \text{ kHz} = F_1 + (N - 1) \cdot 4 \text{ kHz} \end{array}$$

Ciascun filtro di banda, avente il compito di eliminare una delle due bande laterali, deve essere centrato su una frequenza riferita sulla banda superiore (USB), oppure sulla banda laterale inferiore (LSB). La banda passante per ogni filtro sarà pari a quella del segnale fonico (4 kHz).

Gli N segnali ottenuti dal processo di modulazione vengono multiplexati formando così un segnale risultante FDM, cioè un segnale composto di N canali dove in ognuno di essi «risiede» l'informazione del corrispondente segnale tributario.

Il segnale siffatto viene inviato in un unico circuito di trasmissione.

Al lato di ricezione le informazioni singole vengono ripartite ai corrispondenti utenti tramite demultiplazione. La ripartizione si ottiene mediante i filtri di ricezione che isolano le diverse conversazioni ed i rispettivi demodulatori, che riportano i segnali traslati nella propria banda base. I demodulatori, com'è noto, essendo dei rivelatori a prodotto richiedono la ricostruzione di ogni singola frequenza vettrice.

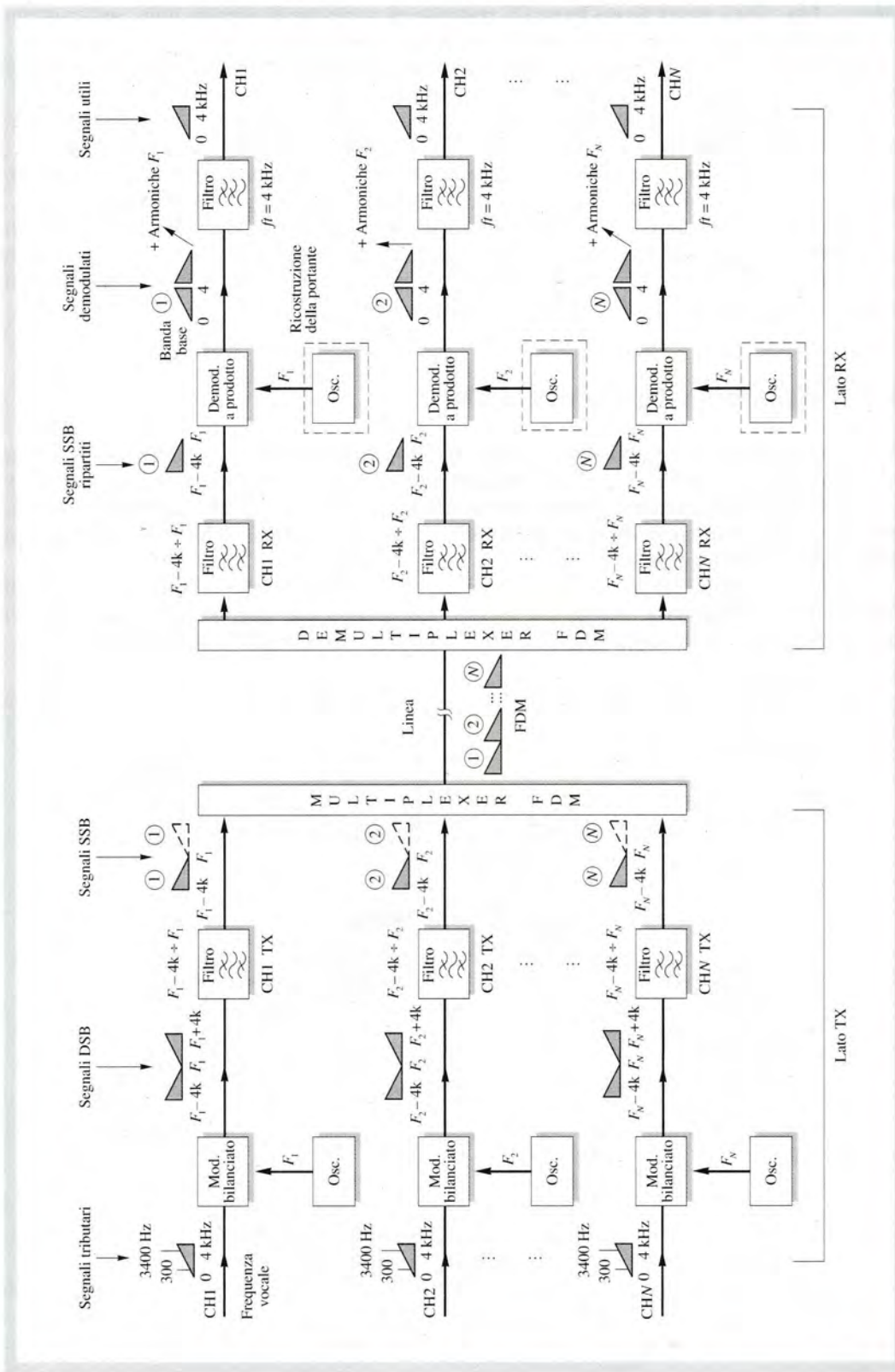


Fig. 4.2
Processo di ricetrasmissione di N canali fonici della tecnica FDM.

Infine, i filtri finali passa basso hanno il compito di prelevare il segnale utile, separandolo dalle frequenze indesiderate prodotte dal demodulatore bilanciato.

Per ciascuno dei canali indicati in fig. 4.2 è possibile pensare di realizzare la trasmissione in entrambi i sensi ed ottenere una ricezione-trasmissione contemporanea su due fili.

Ciò sarà possibile in quanto i canali di trasmissione e di ricezione sono divisi in frequenza, ossia le frequenze vettrici F_1, F_2, \dots, F_N per la trasmissione saranno diverse dalle F'_1, F'_2, \dots, F'_N per la ricezione e pertanto le informazioni sia in un senso sia nell'altro saranno rese separate e ben distinguibili, affinché non si confondano durante il processo.

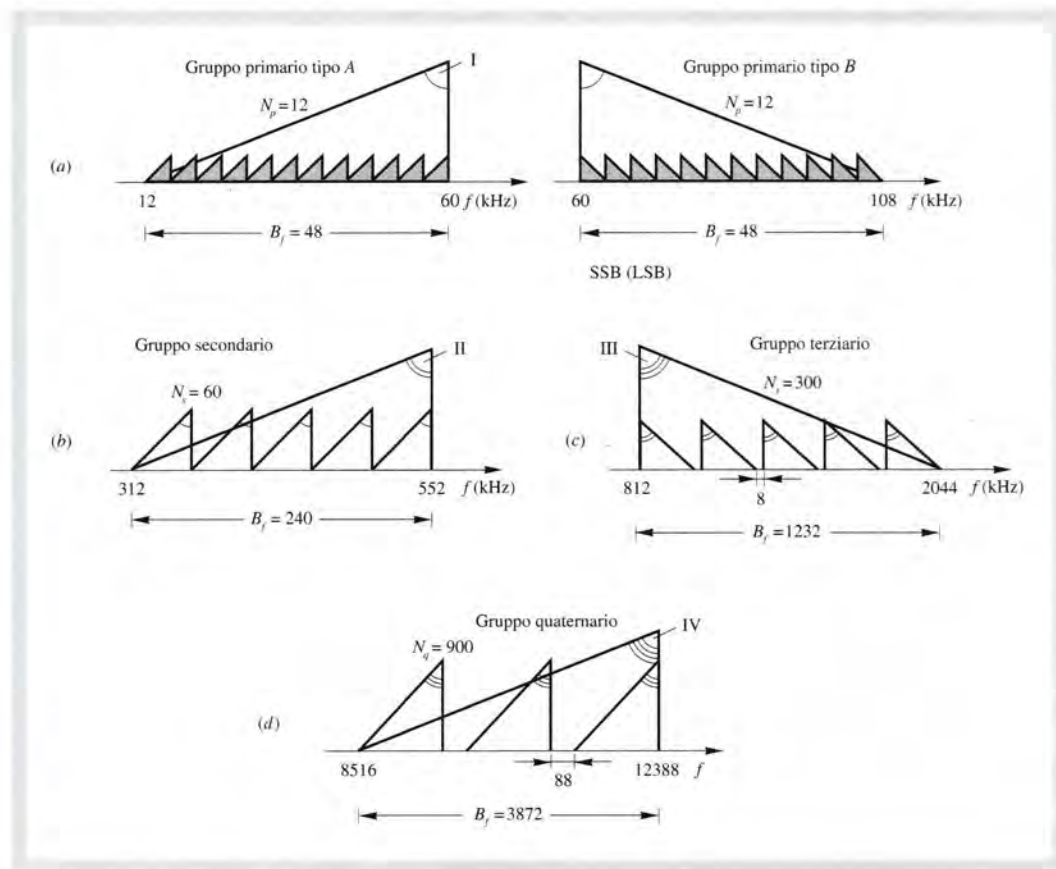
La tecnica FDM può essere realizzata anche su quattro fili. In questo caso i circuiti TX riferiti alle frequenze F_1, \dots, F_N , e RX riferiti alle frequenze F'_1, \dots, F'_N , dei vari canali sono distinti, cioè per la trasmissione e la ricezione del segnale FDM in entrambi i sensi occorrono due fili distinti, due per TX e due per RX.

4.2 Gerarchia telefonica FDM

Se si osserva la fig. 4.2 si nota che l'unico modo per aumentare la capacità del sistema, ossia il numero di canali, è quello di aumentare il numero di frequenze vettrici (*portanti*). Tale aumento comporterebbe conseguentemente l'aumento del numero dei modulatori bilanciati nonché il numero dei filtri di banda ad elevata selettività. I filtri utilizzati in casi simili sono quelli a quarzo.

Pertanto, a parte l'elevato costo del sistema, si riscontrano delle difficoltà dal punto di vista tecnico e funzionale, perché alle elevate frequenze viene degradata la selettività dei filtri a banda stretta (basso fattore di merito), causando così seri problemi in trasmissione.

Fig. 4.3
Formazione di gruppi fondamentali della gerarchia FDM secondo CCITT:
(a) gruppo I di base (12 canali) di tipo A e di tipo B;
(b) gruppo II (60 canali);
(c) gruppo III (300 canali);
(d) gruppo IV (900 canali).



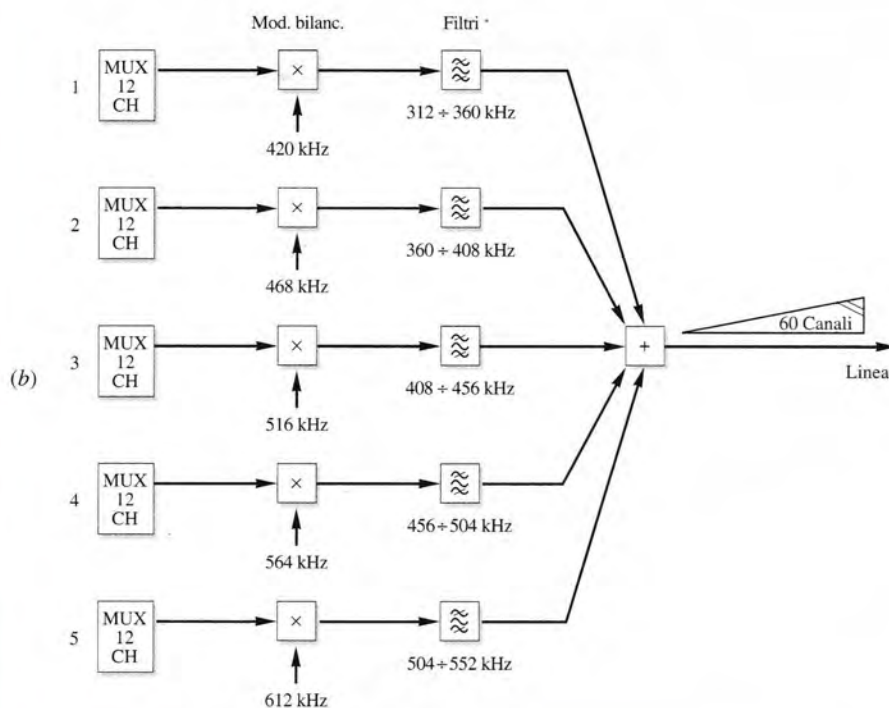
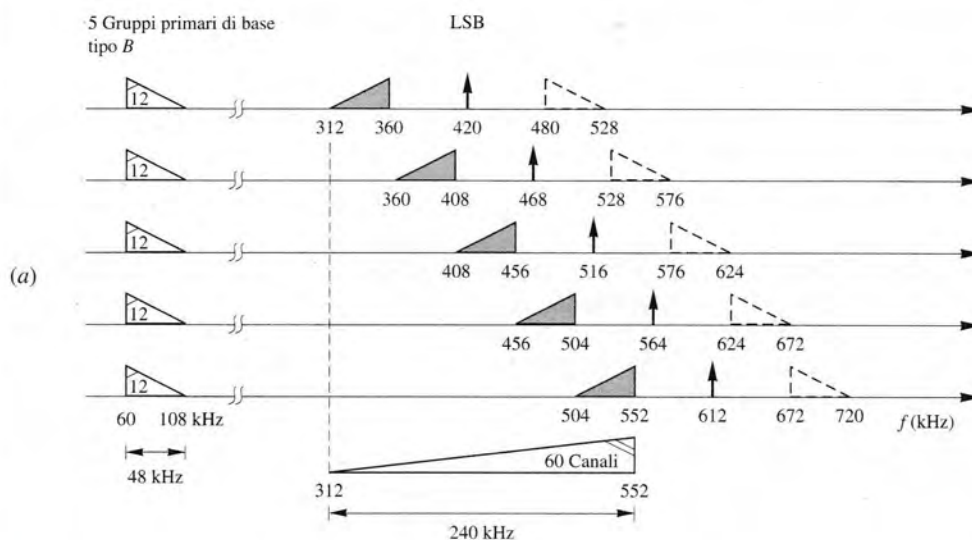
Per aggirare gli ostacoli tecnici e ridurre i costi del sistema si ricorre al metodo di esecuzione per stadi. A tal scopo il CCITT ha emanato delle normative che definiscono la cosiddetta gerarchia dei gruppi telefonici delle FDM come segue:

- gruppo primario di base di tipo A (fig. 4.3a), costituito da 12 canali, ciascuno occupante una banda lorda di 4 kHz, allocato nell'intervallo di frequenza $12 \div 60$ kHz (banda passante complessiva $B_f = 12 \cdot 4 = 48$ kHz);

gruppo
primario

► esercizi
CD-ROM

Fig. 4.4
Formazione
del gruppo
CCITT
secondario:
(a) spettro
del gruppo
secondario;
(b) schema
a blocchi
di un sistema
a 60 canali.



- **gruppo primario di base di tipo B** (fig. 4.3a), costituito da 12 canali, ciascuno occupante una banda lorda di 4 kHz, allocato nell'intervallo di frequenza $60 \div 108$ kHz (banda passante complessiva $B_f = 12 \cdot 4 = 48$ kHz).

Il gruppo di base di tipo A non è utilizzato, se non in casi eccezionali, poiché i modulatori bilanciati, dispositivi non lineari, che impiegano portanti e frequenze più basse, producono delle armoniche che si sovrappongono alla banda utile $12 \div 60$ kHz.

Per tale motivo i seguenti gruppi definiti dal CCITT si riferiscono esclusivamente al gruppo di base di tipo B:

gruppo secondario

► esercizi
CD-ROM

gruppo terziario

interbanda

► ES 1

gruppo quaternario

gruppo pseudo-quaternario

- **gruppo secondario** (fig. 4.3b), costituito da cinque gruppi primari di base da 12 canali, complessivamente da $5 \cdot 12 = 60$ canali, allocato nell'intervallo di frequenza $312 \div 552$ kHz (banda passante complessiva $B_f = 5 \cdot 48 = 240$ kHz).

I cinque gruppi primari modulano cinque portanti di frequenza 420 - 468 - 516 - 564 e 612 kHz rispettivamente e si prelevano le bande laterali inferiori (fig. 4.4a). La fig. 4.4b riporta lo schema a blocchi semplificato di tale sistema a 60 canali;

- **gruppo terziario** (fig. 4.3c), costituito da cinque gruppi secondari da 60 canali, complessivamente da $5 \cdot 60 = 300$ canali, allocato nell'intervallo di frequenza $812 \div 2044$ kHz.

Tra due gruppi secondari contigui è inserita un'interbanda di 8 kHz, margine di frequenza che serve per tutelare il filtraggio alle elevate frequenze (più la frequenza aumenta più la selettività dei filtri si degrada). La banda complessiva risulta $B_f = 240 \cdot 5 + 8 \cdot 4 = 1232$ kHz. I cinque gruppi secondari modulano altrettante portanti di frequenza 1364 - 1612 - 1860 - 2108 e 2356 kHz, prelevando le bande laterali inferiori (fig. 4.5a). Il relativo schema a blocchi del sistema risulta analogo a quello di fig. 4.4b fatta eccezione per le necessarie variazioni dei corrispondenti valori numerici delle frequenze in gioco;

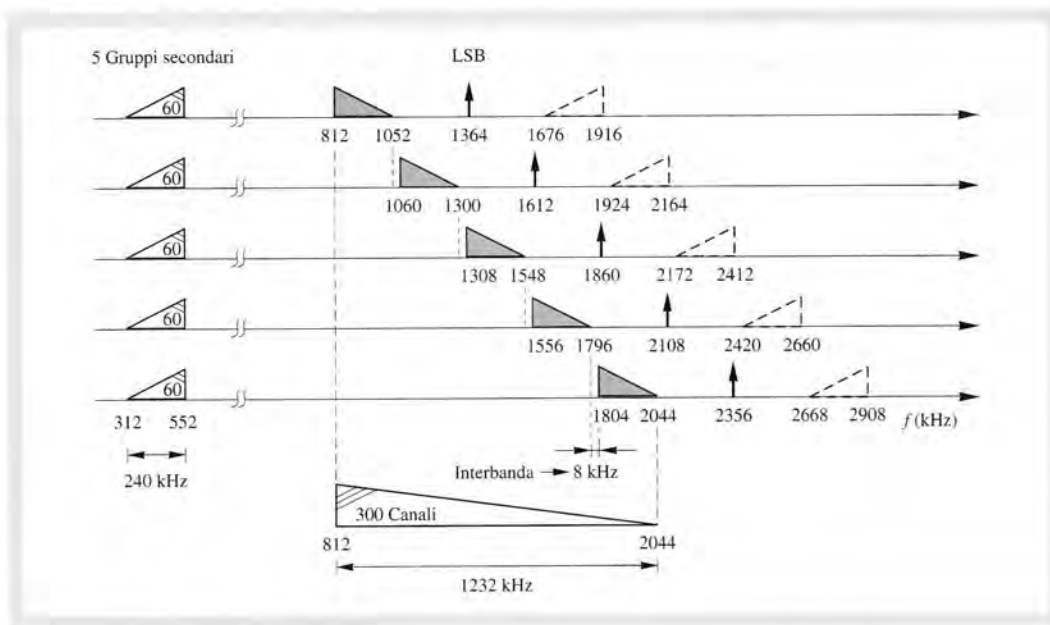
- **gruppo quaternario** (fig. 4.3d), costituito da tre gruppi terziari da 300 canali, complessivamente da $3 \cdot 300 = 900$ canali, allocato nell'intervallo di frequenza $8516 \div 12388$ kHz.

Tra i gruppi terziari contigui è prevista un'interbanda di 88 kHz (banda passante complessiva $B_f = 1232 \cdot 3 + 88 \cdot 2 = 3872$ kHz).

I tre gruppi quaternari, comprensivi delle due interbande, modulano tre portanti di frequenza 10560 - 11880 e 13200 kHz, prelevando le bande laterali inferiori (fig. 4.6). Esiste un altro gruppo, chiamato *pseudo-quaternario*, allocato nell'intervallo $312 \div 4028$ kHz, costituito da 15 gruppi secondari, ossia da 900 canali complessivi.

Lo schema a blocchi del sistema risulta analogo a quello della fig. 4.4b.

Fig. 4.5
Formazione
del gruppo
CCITT
terziario:
spettro
del gruppo
(300 canali).



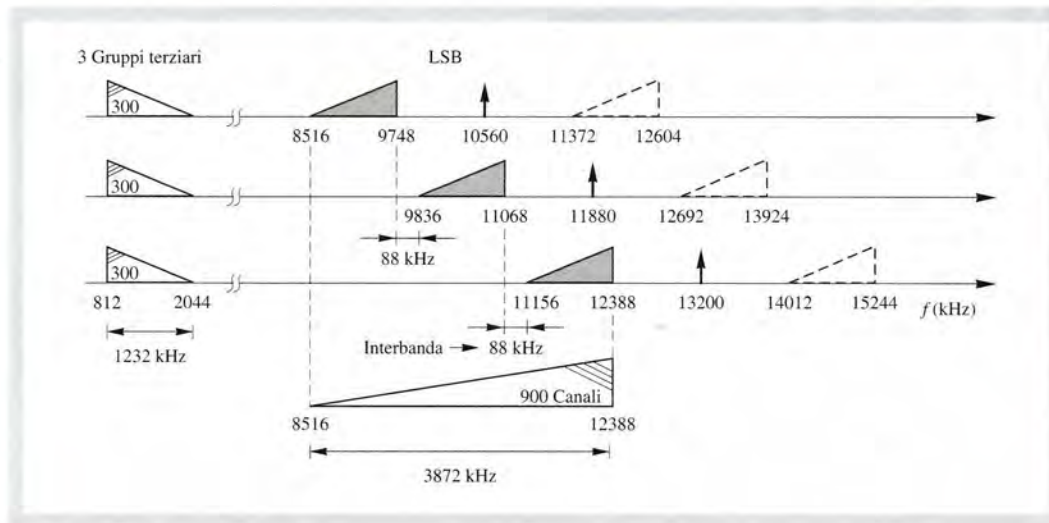


Fig. 4.6
Formazione
del gruppo
CCITT
quaternario:
spettro
del gruppo
(900 canali).

La **tab. 4.1** riassume i gruppi fondamentali della gerarchia FDM.

Si può osservare che i sistemi FDM, realizzati tramite l'esecuzione per stadi stabiliti dal CCITT, riducono notevolmente i costi e la complessità degli impianti rispetto ai sistemi FDM che non rispettano la gerarchia.

**esecuzione
per stadi**

In altri termini, si nota come, tramite esecuzione per gruppi, i dispositivi chiave di questa tecnica, cioè i filtri di banda, si riducono in numero, riferendosi alla massima capacità del sistema (900 canali). In questo caso si richiederebbe il seguente numero di filtri a quarzo:

- per il gruppo primario = n. 12 filtri;
- per il gruppo secondario = n. 5 filtri;
- per il gruppo terziario = n. 5 filtri;
- per il gruppo quaternario = n. 3 filtri.

Pertanto il sistema FDM a 900 canali richiede un numero complessivo di filtri a quarzo di 25 anziché di 900, che richiederebbe lo stesso sistema, se non rispettasse la gerarchia.

Diversa invece è la gerarchia FDM americana definita dall'ATT (*American Telephone & Telegraph Company*). Essa definisce il gruppo primario (chiamato *primo livello*) e secondario (chiamato *secondo livello*) in modo identico al CCITT, mentre è diverso il gruppo terziario (o *terzo livello*) formato da 10 gruppi secondari da 60 canali, realizzando così un sistema costituito complessivamente da $10 \cdot 60 = 600$ canali, occupante una banda totale di 2,52 MHz.

Tab. 4.1

Gruppi	Multipli	n. canali	Frequenza [kHz]	Banda totale [kHz]	Interbanda [kHz]
I	1	12	60 ÷ 108	48	—
II	5	60	312 ÷ 552	240	—
III	5	300	812 ÷ 2044	1232	8
IV	3	900	8516 ÷ 12388	3872	88

4.3 Metodi di canalizzazione

Nella tecnica FDM i metodi che vengono utilizzati per realizzare il gruppo primario di base di tipo B sono:

- metodo a modulazione diretta;
- metodo a doppia modulazione;
- metodo a pre-modulazione.

Affinché i sistemi FDM si rendano pratici e soprattutto economicamente convenienti per i gestori di servizi, è necessario utilizzare metodi adeguati per la formazione del gruppo primario di base.

Si deve quindi:

- a) ridurre il numero di filtri;
- b) ridurre il numero di portanti che comporta un'ulteriore diminuzione dei filtri di banda;
- c) rendere intercambiabili i canali per l'immediata sostituzione nel caso di guasto o di manutenzione.

Per tali motivi il metodo a modulazione diretta è poco utilizzato in quanto costoso sia per l'elevato numero di filtri richiesto sia per la produzione di canali in serie e la manutenzione.

4.3.1 Canalizzazione a modulazione diretta

Nella tecnica FDM attuale è prevista la realizzazione di gruppi di base, detti *primari*, costituiti da 12 semplici canali, ciascuno occupante una banda di 4 kHz.

L'allocazione dei gruppi primari è normalizzata dal CCITT nella banda di frequenza compresa tra 60 e 108 kHz, utilizzando la modulazione LSB, cioè a soppressione delle bande laterali superiori. I gruppi primari così formati occupano una banda complessiva di $B_f = 12 \cdot 4 = 48$ kHz.

Le 12 frequenze vettrici che eseguono la traslazione delle bande singole, assumono valori distanziati di 4 kHz, cioè 64-68-72-76-...-108 kHz.

Per chiarire ulteriormente il processo della modulazione diretta si fa riferimento per semplicità ai primi due segnali tributari (vocali) della fig. 4.2.

I segnali vocali vengono modulati rispettivamente con frequenze vettrici $F_1 = 64$ kHz e $F_2 = 68$ kHz. All'uscita dei modulatori bilanciati si ottengono segnali di tipo DSB, cioè a doppia banda laterale rispetto ai segnali tributari, con ampiezze vettrici soppresse. I filtri di trasmissione, centrati rispettivamente sulle frequenze $f_{c1} = 62$ kHz e $f_{c2} = 66$ kHz aventi bande passanti di 4 kHz, eliminano le bande laterali superiori. Le due bande singole ottenute (60 ÷ 64 e 64 ÷ 68 kHz) vengono sommate formando così il segnale multiplato (in questo caso di ordine 2) da inviare in linea.

Al lato di ricezione i rispettivi filtri, centrati sulle frequenze di 62 e 66 kHz, separano i due canali, che contengono due informazioni diverse, per poterle inviare singolarmente ai corrispondenti utenti.

Poiché al lato di trasmissione la modulazione è ottenuta mediante modulatori bilanciati, al lato di ricezione occorre utilizzare dei rivelatori a prodotto (demodulatori bilanciati), che richiedono la ricostruzione delle frequenze vettrici. A tale scopo si impiegano due dispositivi PLL che generano localmente le frequenze di 64 e 68 kHz aventi le stesse fasi dei segnali originari, evitando così la distorsione di fase del segnale demodulato. Infine i filtri passa basso, aventi frequenze di taglio di 4 kHz, prelevano le bande utili di informazione, eliminando le frequenze residue (armoniche), prodotte dai demodulatori che hanno caratteristiche non lineari.

4.3.2 Canalizzazione a doppia modulazione

Il metodo della modulazione diretta non offre particolari vantaggi in quanto, come già accennato, i 12 segnali tributari modulano in ampiezza altrettanti portanti che richiedono 12 modulatori bilanciati e la presenza di 12 filtri a quarzo.

Allo scopo di ridurre ulteriormente il numero dei filtri, quindi delle portanti, si adotta il metodo della doppia modulazione (fig. 4.7).

Tale metodo utilizza tre gruppi identici costituiti da quattro canali fonici ($0 \div 4$ kHz). Ciascun canale, appartenente allo stesso gruppo, modula rispettivamente quattro portanti distanziate di un intervallo di 4 kHz, ossia 8-12-16 e 20 kHz. Dai segnali DSB ottenuti alle uscite dei modulatori vengono prelevate le bande laterali superiori mediante filtri passa banda, rispettivamente di $8 \div 12$, $12 \div 16$, $16 \div 20$ e $20 \div 24$ kHz. Le tre bande complessive ottenute dai tre gruppi sono allocate nello stesso intervallo di frequenza compreso tra 8 e 24 kHz (banda passante totale = 16 kHz).

A loro volta tali segnali modulano tre portanti, distanziate di un intervallo pari a 16 kHz, di frequenza 84-100 e 116 kHz. Dai segnali modulati DSB si prelevano le bande laterali inferiori tramite filtri aventi bande passanti rispettivamente di $60 \div 76$, $76 \div 92$ e $92 \div 108$ kHz, tenendo presente che le tre bande ottenute dalla prima modulazione hanno una frequenza minima di 8 kHz e perciò ogni banda traslata ottenuta dalla seconda modulazione dista dalla propria portante 8 kHz. La banda risultante compresa tra 60 e 108 kHz è quella corrispondente al gruppo primario di base di tipo B.

Il metodo della doppia modulazione offre i seguenti vantaggi rispetto alla modulazione diretta, osservando lo schema a blocchi della fig. 4.7:

- numero delle portanti richiesto 7 (8-12-16-20-84-100-116 kHz) anziché 12;
- numero di modulatori bilanciati 7 anziché 12;
- numero di filtri a quarzo 7 anziché 12;
- costo complessivo di produzione, manutenzione ed esercizio ridotto;
- ridotta complessità circuitale;
- canali intercambiabili: alcuni dei 12 canali utilizzati risultano dopo la prima modulazione identici in quanto impiegano dispositivi aventi le stesse caratteristiche (occupano la stessa banda di frequenza). Tale fatto comporta un notevole vantaggio per il gestore soprattutto in fase di guasto o di manutenzione oltre che della produzione.

canali
intercambiabili

4.3.3 Canalizzazione a pre-modulazione

Per ottenere a volte, dove è richiesto, risultati e vantaggi migliori si preferisce utilizzare il metodo di pre-modulazione. Tale metodo consiste nel pre-modulare i 12 segnali fonici, traslandoli semplicemente in una banda di $24 \div 28$ kHz comune per tutti. Questo si ottiene modulando i 12 segnali con la stessa portante di frequenza pari a 24 kHz, prelevando tramite filtraggio le bande superiori $24 \div 28$ kHz. Successivamente i 12 canali premodulati modulano 12 portanti prelevando le bande laterali inferiori, di frequenza diversa intervallate di 4 kHz, ossia 88-92-96-100-...-132 kHz, come mostra la fig. 4.8, che illustra la tecnica ora descritta e lo schema a blocchi corrispondente.

pre-modulazione

Tramite opportuno filtraggio vengono prelevate le bande laterali inferiori, formando così il gruppo primario di base di tipo B.

I vantaggi che si ottengono rispetto alla doppia modulazione sono i seguenti:

- maggiore semplicità del sistema;
- possibilità di avere a disposizione più canali intercambiabili;
- possibilità di impiego nella fase di pre-modulazione dei filtri più semplici e meno costosi;
- possibilità di filtraggio della banda utile tramite un unico filtro passa banda, perché, al contrario di quanto accade nei sistemi già analizzati, non si verifica sovrapposizione di bande da sopprimere e bande da prelevare.

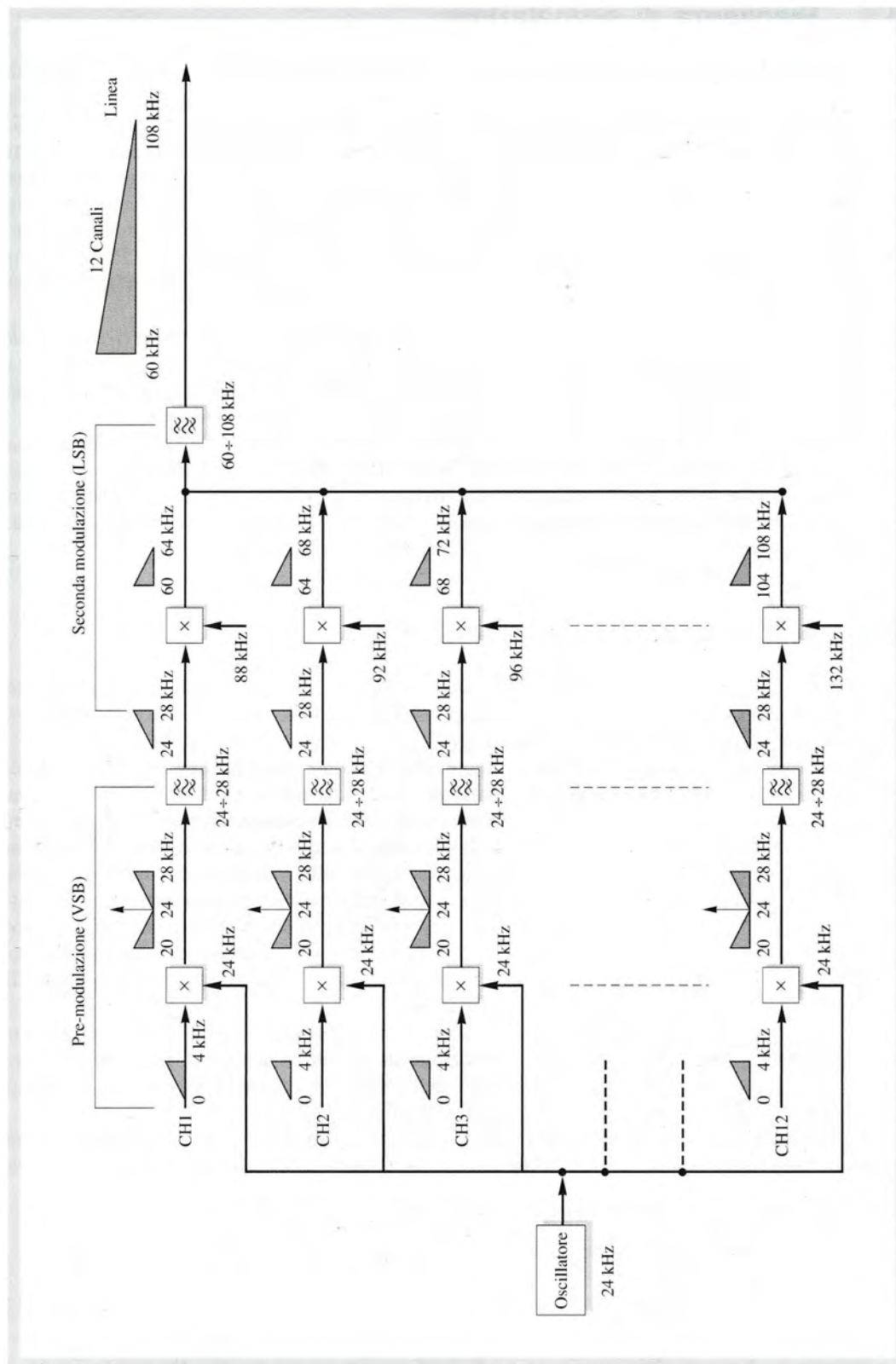


Fig. 4.8
Schema a blocchi del metodo di pre-modulazione.

4.4 Frequenza di segnalazione

frequenza
pilota

Ogni gruppo della gerarchia FDM utilizza una, due o tre frequenze fisse, chiamate *frequenze pilota*, di solito allocate all'inizio, a metà o alla fine di ogni modulo formato. La frequenza pilota serve per controllare i livelli dei segnali tributari che costituiscono i gruppi multiplati.

In altri termini, la frequenza pilota, che ha una frequenza ed un livello ben determinati di valore noto, può in ogni istante fornire indicazioni sulla qualità di trasmissione, ossia sulla attenuazione, inserendo il suo livello nel ricevitore e confrontandolo semplicemente con i limiti consentiti dalle varie normative (circa $\pm 0,3$ dB). Tali frequenze inoltre servono in ricezione per la ricostruzione della portante che richiede l'uso del PLL. Infatti l'anello ad aggancio di fase ha un comportamento corretto quando ha un riferimento preciso di fase.

segnalazione
di chiamata

Oltre alle frequenze pilota vengono utilizzate per ogni canale le cosiddette *frequenze di segnalazione*. Tali frequenze consentono la segnalazione di chiamata proveniente dalla linea (urbana o interurbana) e sono separabili dal segnale vocale. Le frequenze di segnalazione si distinguono in frequenze fuori banda fonica e frequenze in banda fonica.

Nel primo caso la segnalazione avviene tramite frequenza di 3825 Hz, ossia tramite una frequenza che è collocata fuori dalla banda fonica netta 300 ÷ 3400 Hz (fig. 4.1).

Nel secondo caso invece si utilizzano due frequenze di valore 2040 e 2400 Hz. Questo metodo viene impiegato in casi dove è richiesta la protezione dei segnali di segnalazione.

Tuttavia non consentono la segnalazione durante la comunicazione.

4.5 Sintetizzatore di frequenza

Per evitare che nei sistemi FDM si usino più oscillatori quarzati, poiché è richiesta la generazione di un numero elevato di portanti a frequenze diverse, si usano dei dispositivi chiamati *sintetizzatori di frequenza* (fig. 4.9).

Essi consentono, mediante divisori di frequenza, di fornire un gran numero di frequenze, che si ottengono da un unico oscillatore quarzato. In altri termini i sintetizzatori di frequenza producono delle frequenze diverse, mediante controllo esterno al dispositivo, che hanno un rapporto costante rispetto alla frequenza di ingresso assunta come riferimento: la frequenza di uscita del dispositivo sarà multipla rispetto alla frequenza di ingresso.

L'oscillatore impiegato è al quarzo per mantenere una stabilità e precisione della frequenza di riferimento.

Tra i vari metodi adottati per ottenere la realizzazione di un sintetizzatore di frequenza, il metodo dell'anello ad aggancio di fase è quello più utilizzato (fig. 4.9).

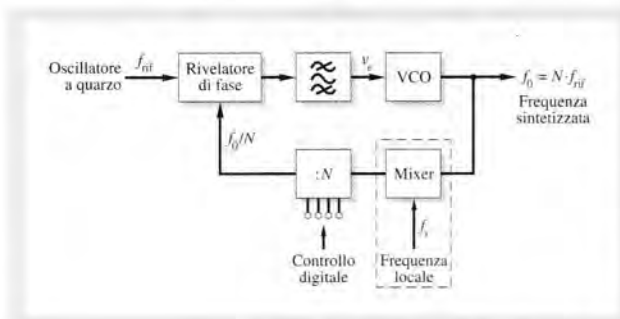


Fig. 4.9
Schema
a blocchi di
un sintetizzatore
di frequenza
digitale.

La frequenza di uscita f_0 viene divisa da un divisore di frequenza programmabile, prima di essere comparata dal rivelatore di fase, e di conseguenza l'uscita del divisore di frequenza $\left(\frac{f_0}{N}\right)$ sarà uguale alla frequenza di riferimento (f_{rif}).

Se N è il fattore di divisione del divisore di frequenza allora si ha:

$$f_{\text{rif}} = \frac{f_0}{N} \quad \text{ossia} \quad f_0 = N \cdot f_{\text{rif}} \quad [1]$$

La frequenza di uscita del sintetizzatore f_0 può variare in modo desiderato, variando il fattore di divisione N . Questo si ottiene programmando opportunamente il divisore, ossia inviando un controllo binario esterno.

Se ad esempio l'oscillatore quarzato oscilla ad una frequenza di 10 kHz ed il controllo programmabile è 0100 (corrispondente a $N=4$), all'uscita del divisore si ha:

$$f_0 = N \cdot f_{\text{rif}} = 4 \cdot 10 = 40 \text{ kHz}$$

modificando il controllo in 1000 si ottiene in uscita $f_0 = 8 \cdot 10 = 80 \text{ kHz}$.

È ovvio che la risoluzione minima in questo caso è di 10 kHz ($f_{\text{rif}} = f_0$) e si verifica quando $N=1$ (0001). La frequenza di riferimento, essendo generata da un oscillatore al quarzo, è molto stabile e rimane sempre fissa. Quando avviene l'aggancio del VCO tra la frequenza di ingresso e la frequenza di riferimento, si stabilisce una relazione costante. Ne deriva che il sintetizzatore si comporta come un generatore di segnale variabile, che ha la capacità di variare la frequenza del segnale in modo stabile. Dalla [1] si nota che la frequenza di uscita f_0 è multipla intera della frequenza di riferimento. Poiché la minima risoluzione si ha quando $f_0 = f_{\text{rif}}$, nel sistema FDM l'intervallo fra le due frequenze vettrici contigue deve essere uguale alla frequenza di riferimento.

risoluzione
minima

Nel gruppo primario ad esempio a doppia modulazione la frequenza di riferimento per la prima modulazione dovrà essere di 4 kHz. Infatti, agendo sul divisore tramite un controllo binario di 0010 ($N=2$), 0011 ($N=3$), 0100 ($N=4$) e 0101 ($N=5$), si ottengono in uscita dal sintetizzatore frequenze rispettivamente di 8 - 12 - 16 e 20 kHz. Anche per la seconda modulazione la frequenza di riferimento dovrà essere di 4 kHz. Per ottenere le frequenze vettrici di 84, 100 e 116 kHz da inviare nei modulatori bilanciati si deve agire sul divisore variando N in modo tale da intervallare tali frequenze di 16 kHz. In questo caso si dovrà programmare il divisore inviando i controlli binari rispettivamente di 10101 ($N=21$), 11001 ($N=25$) e 11101 ($N=29$). Da questo esempio si intuisce che un circuito siffatto non è in grado di ottenere in uscita una serie di frequenze elevate separate da piccoli intervalli in un sistema a larga banda.

A tale scopo si preferisce usare un sistema che preveda l'impiego di un mixer, indicato con il tratteggio in fig. 4.9, che verrebbe inserito prima del blocco di divisione ($:N$).

In questo caso la frequenza di uscita f_0 viene miscelata con una frequenza costante generata localmente (f_s). Il divisore programmabile funziona ad una frequenza più bassa rispetto alla f_0 . La conversione di frequenza permette di mantenere le stesse caratteristiche del PLL (precisione, stabilità, rumore), aumentando la frequenza di uscita.

Si ha infatti all'uscita del mixer: $f_0 \pm f_s$. All'uscita del divisore programmabile quindi si ottiene: $f_0 \pm \frac{f_s}{N}$ e pertanto la frequenza fornita dal sintetizzatore, scegliendo il battimento sopra, è: $f_{\text{rif}} = \frac{f_0 - f_s}{N}$ ossia $f_0 = f_s + N \cdot f_{\text{rif}}$

4.6 Altri sistemi FDM

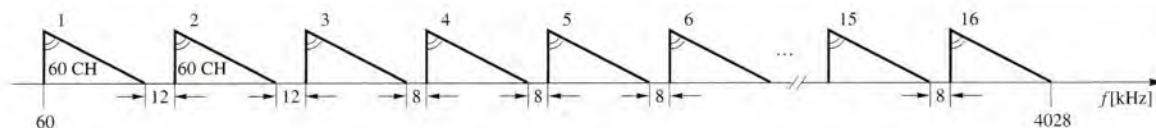
Oltre ai sistemi finora considerati, ossia a 60, 300 e 900 canali, si possono realizzare sistemi costituiti da un numero di canali diverso pur derivando dalla gerarchia FDM. Essi sono distinti in:

- sistemi a 960 canali;
- sistemi a 2700 canali;
- sistemi a 10800 canali.

4.6.1 Sistema a 960 canali

Tale sistema (fig. 4.10) viene chiamato anche sistema a 4 MHz, perché la banda complessiva ottenuta allocata tra 60 ÷ 4028 kHz occupa circa 4 MHz.

Esso viene ottenuto da un insieme di 16 gruppi secondari di larghezza 240 kHz

**Fig. 4.10**

Sistema
a 960 canali
a 4 MHz.

(312 ÷ 552 kHz) da 60 canali, complessivamente da $16 \cdot 60 = 960$ canali. In particolare il primo gruppo secondario modula una portante di 612 kHz (è l'ultimo valore utilizzato per la trasformazione dello stesso gruppo), prelevando la banda laterale inferiore allocata nell'intervallo di 60 ÷ 300 kHz.

Il secondo gruppo secondario viene trasmesso senza subire alcuna modulazione (312 ÷ 552 kHz). In questo modo tra la prima banda e la seconda esiste un'interbanda di 12 kHz.

Il terzo gruppo secondario modula una portante di 1116 kHz, lasciando un'interbanda rispetto alla banda precedente sempre di 12 kHz ($552 + 12 + 240 + 312 = 1116$ kHz).

L'interbanda è di 12 kHz per avere la possibilità di utilizzare per i seguenti cinque gruppi secondari valori di portanti standard impiegate per la formazione del gruppo terziario fino alla frequenza di 2044 kHz. Infatti le portanti assumono valori di 1364 - 1612 - 1860 - 2108 - 2365 kHz, tenendo conto dell'interbanda standard di 8 kHz.

I restanti otto gruppi secondari modulano portanti con frequenze 2604 - 2852 - 3100 - 3348 - 3596 - 3844 - 4092 e 4340 kHz, cioè valori intervallati di $240 + 8 = 248$ kHz rispetto all'ultima portante di 2356 kHz.

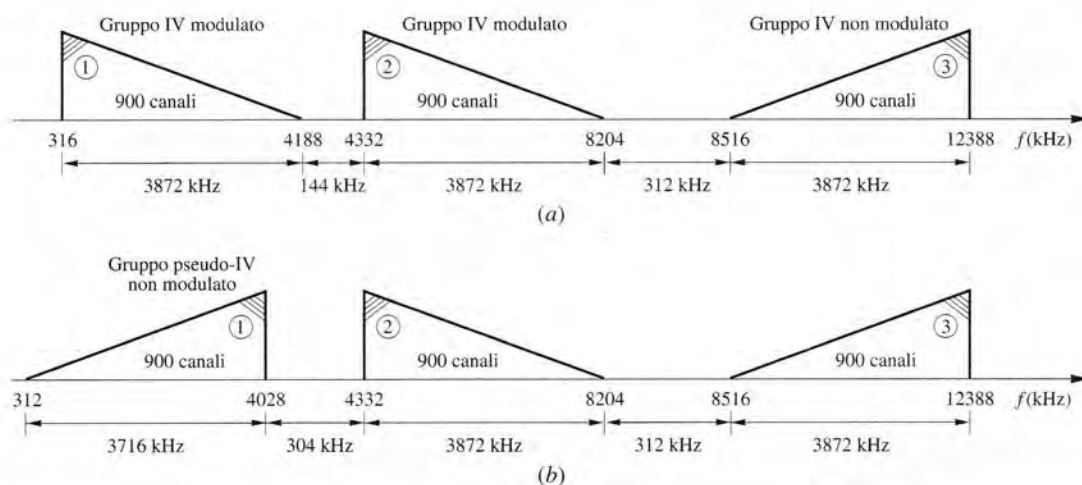
Fig. 4.11

Sistema
a 2700 canali
a 12 MHz:
(a) formazione
con tre gruppi
di base IV;
(b) formazione
con due gruppi
di base IV
ed uno pseudo-
quaternario.

4.6.2 Sistema a 2700 canali

I sistemi a 2700 canali (**fig. 4.11**) vengono anche chiamati sistemi a 12 MHz per il fatto che la banda complessiva occupa una larghezza di circa 12 MHz ($316 \div 12388$ kHz).

Esso è costituito da tre gruppi quaternari da 900 canali, complessivamente da $3 \cdot 900 = 2700$ canali. Più precisamente due gruppi quaternari modulano due portanti con frequenza rispettivamente di 12 704 e 16 720 kHz ($12\,704 + 3872 + 144$ kHz). Le bande ottenute dalle due modulazioni vengono filtrate prelevando le bande laterali inferiori ① e ② le quali occupano intervalli di frequenza rispettivamente di $316 \div 4188$ e $4332 \div 8204$ kHz.



Le due bande così modulate vengono sommate assieme a quella del terzo gruppo quaternario non modulata ③.

Data l'elevata frequenza in cui operano i filtri, per evitare problemi di distorsione è prevista un'interbanda tra i tre gruppi modulati rispettivamente di 144 e 312 kHz (caso a).

Un altro modo per ottenere lo stesso sistema da 2700 canali è quello di utilizzare un gruppo quaternario di base che modula una portante di 16 720 con tecnica LSB ②, un gruppo quaternario di base non modulato ③ ed un terzo gruppo quaternario non modulato, detto *pseudo-quaternario* ①, formato in modo particolare ($8620 \div 12\,336$ kHz), in quanto è costituito da 15 gruppi secondari, complessivamente da $15 \cdot 60 = 900$ canali, allocato nell'intervallo $312 \div 4028$ kHz (caso b).

Dalla somma dei tre gruppi si ottiene una banda complessiva di $312 \div 12\,388$ kHz.

4.6.3 Sistema a 10 800 canali

È il sistema utilizzato dall'Italtel che presenta la massima capacità ottenibile dalla tecnica FDM. È chiamato sistema a 60 MHz ($4404 \div 59\,580$ kHz) ed è costituito da un insieme di 12 gruppi pseudo-quaternari ($8620 \div 12\,336$ kHz), complessivamente da $12 \cdot 900 = 10\,800$ canali.

Strumenti per il ripasso

Gruppo	Numero canali	Formazione gruppo	Interbanda tra canali	Frequenza [kHz]	Banda passante [kHz]
Primario tipo A	12	—	—	12-60	48
Primario tipo B	12	—	—	60-108	48
Secondario	60	5 gruppi primari	—	312-552	240
Terziario	300	5 gruppi secondari	8 kHz	812-2044	1 232
Quaternario	900	3 gruppi terziari	88 kHz	8516-12 388	3 872
Altri sistemi FDM					
Sistema a 4 MHz	960	16 gruppi secondari	8 kHz	60-4028	3 968
Sistema a 12 MHz	2 700	3 gruppi quaternari	44 e 312 kHz	316-12 388	12 072
Sistema a 60 MHz	10 800	12 gruppi quaternari	variabile	4404-59 580	55 176
Tecniche di modulazione					
Tipo	Formazione				
Diretta	12 canali del gruppo primario modulati con 12 portanti (64-68-72-...-108 kHz)				
Doppia modulazione	Prima modulazione: 3 gruppi da 4 canali con larghezza di 4 kHz, modulati rispettivamente con portanti da 8-12-16 e 20 kHz. Seconda modulazione: i gruppi ottenuti vengono modulati con tre portanti da 84-100 e 116 kHz.				
Pre-modulazione	12 canali da 4 kHz vengono modulati con la stessa portante di 24 kHz; successivamente le 12 bande ottenute vengono modulate con altrettanti portanti (88-92-96-...-132 kHz).				

- 1** Ricavare le frequenze delle portanti richieste dai modulatori bilanciati per formare un gruppo terziario FDM.

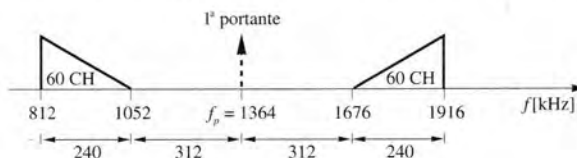
paragrafo
4.2

Soluzione

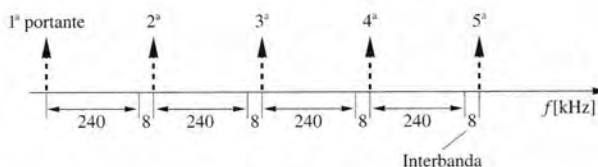
Il gruppo terziario è formato da 5 gruppi secondari e pertanto il sistema richiede 5 modulatori bilanciati ossia 5 portanti. Poiché tale gruppo è compreso fra 812 e 2044 kHz, è necessario utilizzare una interbanda di 8 kHz tra un gruppo e l'altro proprio per facilitare il processo del filtraggio di ogni gruppo in fase di ricezione.

Partendo dalla frequenza minima del gruppo che è di 812 kHz e considerando che ogni gruppo secondario è compreso tra 312 e 552 kHz e occupa una banda di $48 \cdot 5 = 240$ kHz, si possono fare le seguenti considerazioni, facendo riferimento alla figura a fianco:

- frequenza minima della banda laterale inferiore del primo gruppo secondario modulato: 812 kHz;
- larghezza di banda del gruppo secondario: 240 kHz;
- frequenza massima della banda laterale inferiore del primo gruppo secondario modulato: $812 + 240 = 1052$ kHz;
- intervallo di frequenza tra la massima frequenza della banda laterale inferiore e la portante: 312 kHz;
- frequenza della portante del primo gruppo secondario modulato: $1052 + 312 = 1364$ kHz.



Il valore delle restanti 4 portanti è calcolato considerando che l'intervallo di frequenza tra di loro dovrà essere pari alla larghezza di banda del gruppo secondario aggiungendo il valore dell'interbanda ossia $240 + 8 = 248$ kHz, quindi (vedi figura a fianco):



- valore della frequenza della seconda portante: $1364 + 248 = 1612$ kHz;
- valore della frequenza della terza portante: $1612 + 248 = 1860$ kHz;
- valore della frequenza della quarta portante: $1860 + 248 = 2108$ kHz;
- valore della frequenza della quinta portante: $2108 + 248 = 2356$ kHz.

1 Indicare se le seguenti affermazioni sono vere o false e motivare quando possibile la risposta.

a) Il gruppo primario di base è costituito da 24 canali. ☐ V ☐ F

Perché?

b) L'interbanda del gruppo terziario è 8 kHz. ☐ V ☐ F

Perché?

c) Il metodo della doppia modulazione per la formazione del gruppo primario usa due fasi di modulazione, partendo da quattro gruppi ognuno costituito da tre canali fonici. ☐ V ☐ F

Perché?

d) La frequenza di segnalazione fuori banda fonica è collocata a 3825 Hz. ☐ V ☐ F

Perché?

2 Il gruppo pseudo-quaternario è costituito da:

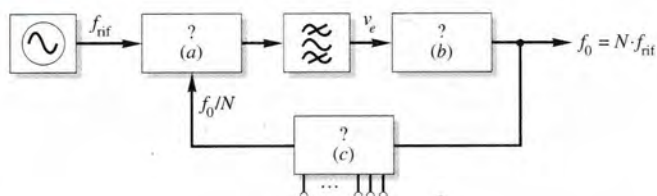
☐ A 3 gruppi terziari da 300 canali = 900 canali.

☐ B 16 gruppi secondari da 60 canali = 960 canali.

☐ C 2 gruppi terziari da 300 canali + 6 gruppi secondari da 60 canali = 960 canali.

☐ D 15 gruppi secondari da 60 canali = 900 canali.

3 Completare lo schema a blocchi corrispondente a un sintetizzatore di frequenza.



4 Lo scopo per il quale si utilizza l'esecuzione per gruppi nella tecnica FDM è quello di ridurre il numero dei di, i quali presentano dei problemi di alle frequenze.

5 Il gruppo secondario FDM è costituito da:

☐ A 5 gruppi primari da 12 canali.

☐ B 3 gruppi primari da 12 canali.

☐ C 5 gruppi primari da 7 canali.

☐ D 4 gruppi primari da 3 canali.

6 In un sistema FDM quali sono gli elementi critici?

☐ A I demodulatori.

☐ B I modulatori.

☐ C Gli oscillatori.

☐ D I filtri.

sul CD-ROM sono presenti
esercizi interattivi

TEST