

## 1 Comunicazioni a distanza

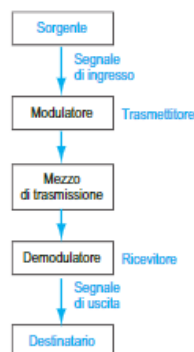


Fig. 1. Schema a blocchi di un sistema di comunicazione.

## ESEMPIO 1

La voce prodotta dalle vibrazioni delle corde vocali umane è costituita da frequenze che vanno da 80 Hz a 7 kHz per la voce maschile e da 160 Hz a 9 kHz per quella femminile, di cui la parte più significativa per una conversazione intelligibile è compresa fra i 300 e i 3.400 Hz (fig. 2).

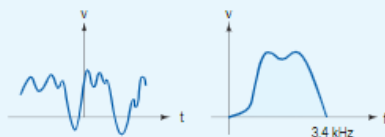


Fig. 2. Segnale vocale.

Per questo motivo, il segnale vocale raccolto dal microfono telefonico viene limitato in banda con un filtro impostato per tali limiti.

Le note musicali sono, invece, delle deformate periodiche le cui frequenze fondamentali vanno da 50 Hz a 4 kHz, fino a 16 kHz includendo anche le armoniche udibili (ipertoni); il segnale audio, o segnale udibile, copre difatti una banda da 16 Hz a 16 kHz. Il segnale musicale può quindi passare solo in parte su una linea telefonica, ovvero solo le frequenze fino a 3.400 Hz.

Un sistema con esigenze di alta fedeltà (HiFi) deve disporre, almeno, di 15 kHz di banda; se poi è in stereofonia deve fornire due canali, destro e sinistro, impegnando un totale di  $2 \cdot 15 = 30$  kHz.

Per il segnale video bianco/nero, lo standard europeo prevede 25 immagini/s, descritte mediante 50 semiquadri/s interlacciati (una volta le righe pari, poi le dispari); ogni quadro completo consta di 625 righe, perciò la frequenza di riga vale:

$$25 \cdot 625 = 15.625 \text{ Hz}$$

Lo scambio di informazioni a distanza tra una sorgente e un destinatario necessita di blocchi specifici di trasmissione e ricezione, all'interno dei quali il segnale, pur mantenendo la sua intelligibilità, subisce cambiamenti nella forma elettrica (fig. 1). Il trasmettitore converte e invia il segnale sorgente adattandolo al mezzo utilizzato per la sua propagazione.

Il ricevitore ricostruisce il segnale originario con un processo inverso rispetto al trasmettitore e lo passa al destinatario.

Poiché ciascun mezzo è caratterizzato da una propria banda di lavoro e da un costo per unità di lunghezza, distanza, velocità di trasmissione e costi sono i fattori che determinano la scelta di una particolare tecnica di trasmissione, associata a un determinato mezzo.

## Banda di segnale

L'informazione da trasmettere può essere:

- un segnale vocale;
- un segnale audio;
- un segnale video;
- sequenze di dati.

I segnali informativi più comuni sono di bassa frequenza e hanno banda limitata.

e la durata del segnale di una riga vale  $64 \mu\text{s}$  lordi, comprensivi del tempo di ritraccia, in pratica  $52,5 \mu\text{s}$  utili. Delle 625 righe/quadro, 25,5 righe/semiquadro rappresentano il tempo di ritorno quadro, perciò si hanno 575 righe utili. Poiché il rapporto lunghezza/altezza dello schermo vale  $4/3$  si considera una definizione orizzontale pari a:

$$575 \cdot 4/3 = 767 \text{ pixel in orizzontale}$$

con una durata del singolo pixel di:

$$\frac{52,5 \mu\text{s}}{767} = 68 \text{ ns}$$

Supponendo l'immagine video una sequenza di pixel bianchi e neri (segnale binario), la frequenza massima vale:

$$f = \frac{1}{2 \cdot 68 \text{ ns}} = 7,35 \text{ MHz}$$

## 1.1 Modulazione

La trasmissione di un segnale via etere necessita di un'antenna, le cui dimensioni dipendono dalla lunghezza d'onda del segnale da irradiare. Poiché la lunghezza d'onda è lo spazio percorso dall'onda elettromagnetica in un periodo ( $\lambda = c \cdot T$ ), per poter utilizzare antenne corte il segnale da irradiare deve avere frequenza elevata. Purtroppo, i segnali telefonici e radiotelevisivi hanno frequenze basse. Pertanto, per consentirne la trasmissione via etere, vanno prima traslati in frequenza su frequenze più elevate congruenti con le antenne utilizzate, trasmessi, e riportati al loro spettro originario in ricezione, mediante processi rispettivamente di modulazione e demodulazione.

La modulazione è il processo di conversione di un'informazione analogica o digitale in segnali a radio frequenza adatti alla banda del mezzo trasmissivo.

Per ottenere la traslazione della banda si utilizza un segnale detto portante (carrier), di frequenza adatta a essere trasmessa lungo il mezzo disponibile, modificato in almeno uno dei suoi parametri (ampiezza, frequenza, fase) dal segnale informativo, detto modulante. Il segnale così ottenuto, detto modulato, contiene l'informazione iniziale che può essere estratta dal ricevitore mediante il processo di demodulazione.

Il segnale modulante è detto in banda base, mentre il segnale modulato è detto in banda traslata.

Le tecniche di modulazione si suddividono in analogiche e digitali (fig. 3).

Nelle modulazioni analogiche la portante è modulata da un segnale analogico, mentre nelle modulazioni digitali la modulante è numerica.

Il processo di modulazione è utilizzato anche nelle trasmissioni su cavo, quando il mezzo non consente il passaggio di frequenze vicino allo zero, oppure laddove il mezzo ha un comportamento ideale solo in certi intervalli di frequenza.

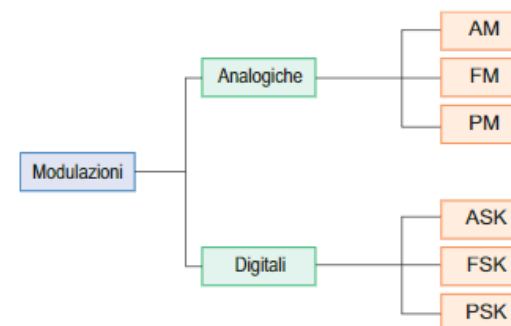


Fig. 3. Classificazione delle modulazioni.

## 2 Modulazione di ampiezza AM

Data una portante sinusoidale, i parametri che possono essere modulati sono l'ampiezza, la frequenza e la fase ottenendo rispettivamente le modulazioni AM, FM, PM.

La prima tecnica usata nelle trasmissioni radio e telefoniche è stata la AM.

Nella **modulazione di ampiezza** (AM, *Amplitude Modulation*) la portante analogica subisce una variazione di ampiezza proporzionale, istante per istante, al valore assunto dal segnale analogico modulante.

Considerando, per semplicità, il segnale modulante  $m(t)$  e la portante  $p(t)$  cosinusoidali con pulsazione angolare  $\omega_p \gg \omega_m$ :

$$p(t) = P \cdot \cos(\omega_p \cdot t)$$

$$m(t) = M \cdot \cos(\omega_m \cdot t)$$

il segnale modulato in ampiezza può essere espresso dalla:

$$v_{am}(t) = [P + k \cdot m(t)] \cdot \cos(\omega_p \cdot t) = [P + k \cdot M \cdot \cos(\omega_m \cdot t)] \cdot \cos(\omega_p \cdot t) = P \cdot [1 + m_a \cdot \cos(\omega_m \cdot t)] \cdot \cos(\omega_p \cdot t)$$

dove  $m_a$ , detto **indice di modulazione**, indica l'incidenza della modulante sull'ampiezza della portante:

$$m_a = \frac{k \cdot M}{P}$$

Il parametro  $k$ , noto come **sensibilità del modulatore AM**, esprime di quanto varia l'ampiezza della portante per ogni 1 V di ampiezza della modulante e deve essere tale che  $m_a$  risulti minore di uno per non cadere in sovramodulazione, causando distorsioni nel segnale. In **fig. 4** sono riportati gli andamenti nel tempo dei segnali caratteristici della modulazione AM e i relativi spettri.

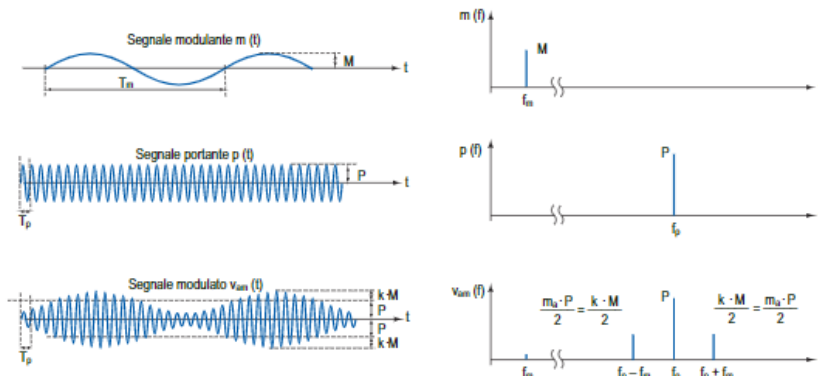


Fig. 4. Segnale modulante  $m$ ; segnale portante  $p$ ; segnale modulato  $v_{am}$  e relativi spettri.

Il processo di modulazione che ne deriva è in pratica una moltiplicazione tra il messaggio e la portante. Ricordando che:

$$\cos x \cdot \cos y = \frac{1}{2} \cdot [\cos(x - y) + \cos(x + y)]$$

si può riscrivere il segnale modulato:

$$v_{am}(t) = P \cdot [1 + m_a \cdot \cos(\omega_m \cdot t)] \cdot \cos(\omega_p \cdot t)$$

come:

$$v_{am}(t) = P \cdot \cos(\omega_p \cdot t) + \frac{m_a \cdot P}{2} \cdot [\cos(\omega_p - \omega_m) \cdot t + \cos(\omega_p + \omega_m) \cdot t]$$

dalla quale è possibile individuare le tre righe dello spettro di ampiezza, cioè la portante di ampiezza  $P$  alla pulsazione  $\omega_p$  e le due righe laterali, di ampiezza:

$$\frac{m_a \cdot P}{2} = \frac{k \cdot M}{2}$$

e pulsazione rispettivamente:  $\omega_p - \omega_m$  e  $\omega_p + \omega_m$

L'operazione di modulazione consente, quindi, di traslare il messaggio, sull'asse delle frequenze, di una quantità pari alla frequenza della portante. Se la frequenza portante è sufficientemente alta, il segnale modulato può essere inviato a un'antenna e irradiato nello spazio sotto forma di onde elettromagnetiche.

Una frazione di tempo dopo, le onde sono intercettate dall'antenna ricevente e riconvertite in segnale elettrico, il quale, pur debole per le perdite di potenza in aria libera, viene demodulato, amplificato dal ricevitore e riprodotto al destinatario. La demodulazione consiste ancora in un prodotto, questa volta tra il segnale modulato ricevuto e la frequenza della portante, che riporta tra i risultati il segnale modulante originario in banda base.

In trasmissione, gran parte della potenza risulta impegnata nella trasmissione della portante, mentre solo una parte sostiene l'invio del contenuto informativo presente nelle due linee laterali. Il rendimento di modulazione, definito come rapporto tra la potenza richiesta per trasmettere una banda laterale e la potenza totale impiegata, risulta quindi basso.

Quanto descritto per un segnale sinusoidale si può estendere per qualunque segnale modulante. In **fig. 5**, per esempio, è riportato lo spettro di un segnale modulante di banda pari a  $B = f_{m2} - f_{m1}$ ; in **fig. 6**, invece, è riportato lo spettro del segnale modulato con portante a frequenza  $f_p$ .

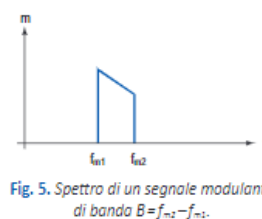


Fig. 5. Spettro di un segnale modulante di banda  $B = f_{m2} - f_{m1}$ .

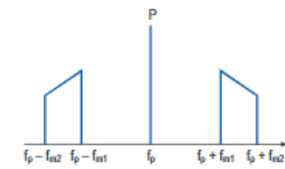


Fig. 6. Spettro del segnale modulato.

Per ottimizzare l'occupazione della banda e impegnare minor potenza in trasmissione, senza perdere contenuto informativo, si utilizzano modulazioni AM particolari. La modulazione **DSB-SC** (*Double Side Band – Suppressed Carrier*, **fig. 7**), detta semplicemente DSB, trasmette solo le due bande laterali e sopprime la portante.



Fig. 7. Spettro di un segnale modulato DSB.

La **SSB** (*Single Side Band*, **fig. 8**) trasmette solo una delle bande laterali, filtrando prima della trasmissione la portante e l'altra banda laterale.

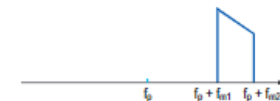


Fig. 8. Spettro di un segnale modulato SSB.

Il miglior rendimento di modulazione e una banda minore vengono ottenute a scapito di un circuito di demodulazione più complesso che, come prima cosa, deve ricostruire la portante nel modo più preciso possibile per evitare distorsioni del segnale ricostruito.

### ESEMPIO 2

Una portante a 100 kHz è modulata in ampiezza con un segnale da 2 kHz. Determinare le righe spettrali presenti nel segnale modulato nei casi di modulazione AM, DSB, SSB.

#### SOLUZIONE

Con modulazione AM, il segnale modulato presenta la portante da 100 kHz e due righe laterali, inferiore a 98 kHz e superiore a 102 kHz. Nel caso di modulazione DSB, la portante viene soppressa, pertanto il segnale modulato presenta solo le due righe laterali a 98 e 102 kHz. Con modulazione SSB, il segnale modulato presenta una sola riga, a 98 kHz oppure a 102 kHz.

➔ Mettiti alla prova con gli esercizi A, 1 – B, 2, 3 pagg. 414-415

### 3 Modulazione di frequenza FM

Nella modulazione di frequenza (FM, *Frequency Modulation*) il segnale modulante modifica istante per istante la frequenza della portante, lasciandone inalterata l'ampiezza (fig. 9).

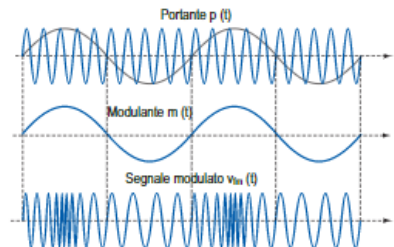


Fig. 9. Portante, modulante e segnale modulato in frequenza.

Se il segnale modulante è cosinusoidale:

$$m(t) = M \cdot \cos(\omega_m \cdot t)$$

indicando con  $k_f$  la sensibilità del modulatore  $\left[\frac{\text{rad/s}}{\text{V}}\right]$ , la pulsazione del segnale modulato vale:

$$\omega(t) = \omega_p + k_f \cdot m(t) = \omega_p + k_f \cdot M \cdot \cos(\omega_m \cdot t) \quad (1)$$

e la fase:

$$\varphi(t) = \int_0^t \omega(t) \cdot dt = \omega_p \cdot t + k_f \cdot M \cdot \int_0^t \cos(\omega_m \cdot t) \cdot dt$$

pertanto, l'espressione del segnale modulato, in funzione del tempo, si esprime con la:

$$v_{fm}(t) = P \cdot \cos[\omega_p \cdot t + k_f \cdot \frac{M}{\omega_m} \cdot \sin(\omega_m \cdot t)]$$

Dalla (1) risulta che la massima deviazione di pulsazione rispetto alla portante vale:

$$\Delta\omega = k_f \cdot M$$

Da questa si può individuare la massima deviazione di frequenza rispetto alla frequenza della portante:

$$\Delta f = k_f \cdot \frac{M}{2\pi}$$

e determinare l'indice di modulazione di frequenza:

$$m_f = \frac{\Delta f}{f_m}$$

quale rapporto tra la massima deviazione di frequenza del segnale modulato e la frequenza della modulante.

Considerato che l'indice di modulazione vale anche:

$$m_f = \frac{\Delta f}{f_m} = k_f \cdot \frac{M}{2\pi} \cdot \frac{1}{f_m} = k_f \cdot \frac{M}{\omega_m}$$

l'espressione del segnale modulato può essere riscritta in modo più semplice nella forma:

$$v_{fm}(t) = P \cdot \cos[\omega_p \cdot t + m_f \cdot \sin(\omega_m \cdot t)]$$

Rispetto alla portante  $f_p$ , lo spettro acquista due bande laterali, questa volta ciascuna con un proprio contenuto informativo.

Senza entrare in eccessivi formalismi matematici, indicando con  $f_m$  la banda del segnale modulante, si può dimostrare che il 90% della potenza del segnale modulato si addensa in una banda che vale  $(f_m + \Delta f)$  su ciascun lato della frequenza portante.

La banda del segnale modulato può quindi essere approssimata al valore:

$$B = 2 \cdot (\Delta f + f_m) = 2 \cdot f_m \cdot (1 + m_f)$$

Per indici di modulazione piccoli ( $m_f < 0,2$ ), la banda occupata è simile a quella della DSB ( $B = 2 \cdot f_m$ ), mentre con indici grandi ( $m_f \gg 1$ ) si ha  $B \approx 2 \cdot \Delta f$ .

### ESEMPIO 3

In un sistema FM la frequenza della portante varia tra 99,95 MHz e 100,05 MHz perché modulata da un segnale con  $f_m = 5$  kHz. Determinare la frequenza della portante, l'indice di modulazione e la banda occupata.

#### SOLUZIONE

La variazione di frequenza della portante è pari a  $2 \cdot \Delta f$ :

$$2 \cdot \Delta f = 100,05 - 99,95 = 0,1 \text{ MHz} = 100 \text{ kHz}$$

La frequenza della portante è a metà tra  $f_{\text{max}}$  e  $f_{\text{min}}$ :

$$f_p = \frac{100,05 + 99,95}{2} = 100 \text{ MHz}$$

L'indice di modulazione è:

$$m_f = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{50 \text{ kHz}}{5 \text{ kHz}} = 10$$

La banda occupata:

$$B = 2 \cdot (\Delta f + f_m) = 2 \cdot (50 + 5) = 110 \text{ kHz}$$



### Trasmissioni Radio FM

Nel caso della **trasmissione radio FM**, ciascun segnale audio è limitato in banda all'origine a 15 kHz e modula la portante di canale con indice di modulazione  $m = 5$ , ottenendo una deviazione di frequenza massima di 75 kHz. Ciascun canale impegna, quindi, una banda:

$$B = 2 \cdot (\Delta f + f_m) = 2 \cdot (75 + 15) = 180 \text{ kHz}$$

cioè  $\pm 90$  kHz simmetrici attorno alla portante (molti di più dei 15 kHz che occorrebbero per una modulazione SSB).

Per prevenire interferenze tra i canali e facilitare l'estrazione del segnale in ricezione, la banda lorda riservata a un canale FM è di 200 kHz.

Tale caratteristica sconsiglia l'uso della trasmissione FM nel campo delle medie frequenze (300 kHz  $\pm$  3 MHz), in quanto non sarebbe possibile allocare in tale banda più di tredici canali. La radiodiffusione FM impegna, difatti, la zona VHF delle frequenze con portanti comprese tra gli 88 e i 108 MHz, per un totale di 100 canali. Data la maggior frequenza e la conseguente maggiore attenuazione, la trasmissione non supera gli 80-90 km, cioè, a parità di potenza trasmessa, una distanza minore rispetto alla modulazione AM.

La modulazione FM può vantare una maggiore immunità ai disturbi e richiede in trasmissione una potenza costante, pari alla potenza necessaria a trasmettere, in assenza del segnale modulante, la sola portante non modulata.

Oltre alla radio, la trasmissione FM è utilizzata nei sistemi mobili quali i radiotaxi, le autoambulanze, le navi, ecc., cui sono assegnate bande sparse in HF, VHF, UHF. Il problema maggiore è il limite imposto dalla curvatura terrestre.

➔ Mettiti alla prova con gli esercizi C, 4 pag. 415 - D, E, 5, 6 a pag. 416

### 3.1 Varchi antitaccheggio a 8,2 MHz

L'utilizzo della modulazione FM non è limitato alle comunicazioni radio, ma si riscontra anche in numerose applicazioni industriali, per esempio nella gestione dei varchi antitaccheggio.

L'antitaccheggio è una misura di controllo che serve a prevenire o a individuare il furto di una merce.

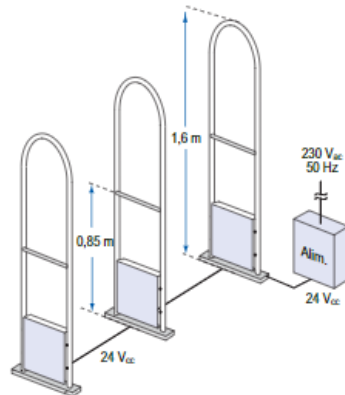
Un varco antitaccheggio a 8,2 MHz si compone di almeno due antenne, una di trasmissione e l'altra di ricezione, e di etichette adesive (tag) poste sugli elementi da proteggere, contenenti un circuito LC accordato, risonante a circa 8,2 MHz (fig. 10). L'antenna direzionale di trasmissione, posta in prossimità del varco da proteggere (fig. 11), emette un segnale elettromagnetico di bassa potenza (< 500 mW) a circa 8,2 MHz  $\pm$  400 kHz, modulato in frequenza con una sinusoide di 78/82/86 Hz, scelta secondo il tipo e le dimensioni delle etichette utilizzate.



Fig. 10. Etichette adesive con elemento risonante.



Fig. 11. Posizionamento delle antenne.



Il segnale catturato dall'antenna ricevente, posta frontalmente a 1-2 m dalla prima, viene amplificato, demodulato e successivamente elaborato da un microcontrollore, alla ricerca di eventuali discontinuità nel segnale di bassa frequenza, che, evidenziando la presenza di una etichetta passiva in risonanza (fig. 12), attivano il dispositivo di segnalazione.

Il tutto funziona tipicamente con 24 V in continua e meno di 0,5 A.

Per non interessare le etichette distribuite a protezione degli articoli esposti in prossimità dell'impianto, la potenza emessa, da regolare in fase di installazione, deve essere quella strettamente necessaria a chiudersi tra le due antenne. Le etichette adesive possono essere neutralizzate sottoponendole, mediante un piano magnetico (fig. 13), a un campo di risonanza talmente intenso da indurre nel circuito interno una tensione che degrada il condensatore.

In alternativa possono essere utilizzati dispositivi in contenitore rigido (fig. 14), più costosi (10 centesimi) e, quindi, da staccare a pagamento avvenuto, per essere riutilizzati.

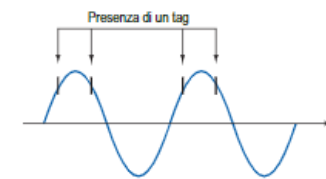


Fig. 12. Presenza di un tag all'interno del campo.



Fig. 13. Disattivatore (Amteck - Prix Italia).



Fig. 14. Dispositivo in contenitore rigido.

## 4 Modulazione di fase (PM)

La modulazione di **fase** (PM, *Phase Modulation*) è una modulazione angolare, in quanto l'informazione viene trasmessa variando la fase della portante, lasciando l'ampiezza costante.

Partendo dalla portante:

$$p(t) = P \cdot \cos(\omega_p \cdot t)$$

si ottiene la modulata:

$$v(t) = P \cdot \cos(\omega_p \cdot t + k_p \cdot M \cdot \cos(\omega_m \cdot t)) = P \cdot \cos(\omega_p \cdot t + \varphi(t))$$

Il coefficiente  $k_p \cdot M$ , denominato **indice di modulazione di fase**, rappresenta la deviazione massima della fase e considerando che:

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}$$

risulta:

$$\omega(t) = \omega_p + k_p \cdot M \cdot \omega_m \cdot \sin(\omega_m \cdot t)$$

dalla quale si vede come la modulazione di fase comporti una variazione di frequenza rispetto a  $\omega_p$ , simile alla modulazione di frequenza.

La modulazione di fase occupa di fatto una banda pari alla FM.

## 5 Multiplazione a divisione di frequenza

I segnali da trasmettere sono nella maggior parte di bassa frequenza e con banda limitata. I canali fisici, da parte loro, lasciano transitare una banda di frequenze ben più ampia, limitata tra due valori estremi, minimo e massimo. Se la banda passante del canale inizia da zero, o poco più, il canale viene detto **in banda base**. Se un canale, come spesso accade, presenta una banda più ampia di quella necessa-

ria alla trasmissione di un singolo segnale, è possibile utilizzarlo per trasmettere più segnali contemporaneamente, applicando la tecnica di **moltiplicazione in frequenza** (FDM, *Frequency Division Multiplexing*), mantenendo i segnali distinguibili tra loro.

Con questa tecnica, lo spettro di ciascun segnale viene traslato di un valore tale da suddividere la banda disponibile tra le diverse sorgenti, in modo che ciascuno di essi occupi una propria banda riservata di frequenze.

#### ESEMPIO 4

Nella radiodiffusione, più stazioni emittenti vengono diffuse nell'etere, cioè sul medesimo mezzo trasmissivo, senza che si producano interferenze fra le diverse sorgenti, e, analogamente, in ricezione, ciascun ricevitore può sintonizzarsi su una delle emittenti e demodulare il segnale senza subire interferenze dalle altre stazioni. La radiodiffusione AM suddivide la banda disponibile, da 540 kHz a 1.600 kHz, in canali indipendenti da 10 kHz assegnati alle diverse stazioni, mentre la banda FM, da 88 a 108 MHz, è suddivisa in canali da 200 kHz.

Per traslare lo spettro di un segnale sull'asse delle frequenze di una quantità pre-determinata, lasciando inalterate le distanze fra le singole componenti armoniche e, quindi, anche l'ampiezza di banda del segnale, si utilizza la medesima tecnica della conversione di frequenza, vista nella modulazione di ampiezza.

Il processo è ottenuto moltiplicando il segnale  $v_s$  per la portante  $v_p$  (frequenza vettrice):

$$\begin{aligned} & [V_p \cdot \cos(\omega_p \cdot t)] \cdot [V_s \cdot \cos(\omega_s \cdot t)] = \\ & = \frac{1}{2} \cdot V_p \cdot V_s \cdot \cos(\omega_p + \omega_s) \cdot t + \frac{1}{2} \cdot V_p \cdot V_s \cdot \cos(\omega_p - \omega_s) \cdot t \end{aligned}$$

e filtrando una delle bande laterali ottenute.

In ricezione, moltiplicando il tutto ancora per  $\omega_p$  si ottengono due segnali:

$$[\cos(\omega_p + \omega_s) \cdot t] \cdot \cos(\omega_p \cdot t) = \frac{1}{2} \cdot \cos(\omega_s \cdot t) + \frac{1}{2} \cdot \cos[(2 \cdot \omega_p + \omega_s)] \cdot t$$

di cui uno coincidente con la banda originaria ( $\omega_s$ ) e un secondo a frequenza doppia della portante ( $2 \cdot \omega_p + \omega_s$ ), da filtrare.

#### ESEMPIO 5

In campo telefonico, considerando la banda vocale utile da 300 Hz a 3.400 Hz, si assegnano 4 kHz lordi di canale a ciascun utente. Ciascuna comunicazione viene traslata in frequenza, mediante una frequenza vettrice standard disponibile tra dodici valori distinti 4 kHz tra loro (a partire da 64 kHz e fino a 108 kHz), e filtrata in modo che passi la sola banda inferiore (SSB).

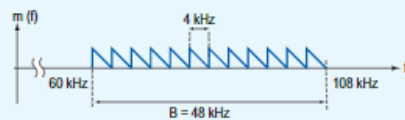


Fig. 15. Moltiplicazione di dodici segnali telefonici.

Il pacchetto, detto gruppo base primario, impegna una banda di  $12 \cdot 4 = 48$  kHz, da 60 a 108 kHz (fig. 15). In ricezione, a ciascun demodulatore viene anteposto un filtro selettivo centrato sulla banda di interesse. La moltiplicazione può essere portata a un livello superiore di frequenze, abbinando tra loro più pacchetti, secondo una gerarchia normalizzata da convenzioni internazionali (CCITT, Comitato Consultivo Internazionale Telegrafico e Telefonico).

In pratica vengono realizzati apparati FDM con capacità da un minimo di 12, sino a un massimo di 10.800 segnali telefonici, impiegando come mezzi il doppino, i cavi multipli, il cavo coassiale o i ponti radio, in base alla banda impegnata e alla distanza da coprire.

### ESERCIZIO SVOLTO D



In un sistema FM, la frequenza della portante varia tra 99,97 MHz e 100,03 MHz perché modulata da un segnale con  $f_m = 4,5$  kHz. Determinare la frequenza della portante, l'indice di modulazione e la banda occupata.

#### SOLUZIONE

La variazione di frequenza della portante è pari a:

$$2 \cdot \Delta f = 100,03 - 99,97 = 0,06 \text{ MHz} = 60 \text{ kHz}$$

La frequenza della portante è a metà tra  $f_{\max}$  e  $f_{\min}$ :

$$f_p = \frac{100,03 + 99,97}{2} = 100 \text{ MHz}$$

L'indice di modulazione è:

$$m_f = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{30 \text{ kHz}}{4,5 \text{ kHz}} = 6,6$$

La banda occupata:

$$B = 2 \cdot (\Delta f + f_m) = 2 \cdot (30 + 4,5) = 69 \text{ kHz}$$

### ESERCIZIO SVOLTO E



Una portante viene modulata in frequenza con costante  $k_f = 12.560 \frac{\text{rad/s}}{\text{V}}$  e frequenza modulante 15 kHz. Determinare l'ampiezza del segnale modulante che consente una deviazione di frequenza  $\Delta f = 35$  kHz, l'indice di modulazione e la banda occupata.

#### SOLUZIONE

Dalla deviazione di frequenza:

$$\Delta f = \frac{k_f M}{2\pi}$$

si ricava l'ampiezza del segnale modulante:

$$M = \frac{\Delta f \cdot 2\pi}{k_f} = \frac{35 \cdot 10^3 \cdot 2\pi}{12.560} = 17,5 \text{ V}$$

L'indice di modulazione e la banda occupata valgono rispettivamente:

$$m_f = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{35 \text{ kHz}}{15 \text{ kHz}} = 2,3$$

$$B = 2 \cdot (\Delta f + f_m) = 2 \cdot (35 + 15) = 100 \text{ kHz}$$

### ESERCIZIO 5



Una portante viene modulata in frequenza con costante  $k_f = 10.000 \frac{\text{rad/s}}{\text{V}}$  e frequenza modulante 5 kHz. Determinare l'ampiezza del segnale modu-

lante che consente di ottenere una deviazione di frequenza  $\Delta f = 35$  kHz, l'indice di modulazione e la banda occupata.

[Ris.: 22 V;  $m_f = 7$ ;  $B = 80$  kHz]

### ESERCIZIO 6



Una portante da 107,8 MHz è modulata in frequenza da un'onda sinusoidale da 8 kHz, con deviazione di frequenza  $\Delta f = 50$  kHz. Determinare le frequenze minima e massima, la banda occupata e l'indice di modulazione.

[Ris.:  $f_{\max} = 107,85$  kHz;  $f_{\min} = 107,75$  kHz;  $B = 116$  kHz;  $m_f = 6,25$ ]

### ESERCIZIO SVOLTO F



Si vogliono trasmettere più segnali audio con banda 15 kHz, modulati AM con indice di modulazione  $m_a = 0,5$ , su un canale di banda 1 MHz. Determinare il numero di canali allocabili in FDM, la potenza totale di ciascun canale e il valore efficace della portante, sapendo che la potenza di una banda laterale vale  $P_l = 10$  W e che il carico ( $R_l$ ) è da 75  $\Omega$ .

#### SOLUZIONE

Modulando AM un segnale da 15 kHz, si occupa una banda di 30 kHz e riservando 3 kHz (10%) alla separazione tra bande adiacenti per evitare interferenze, le bande che è possibile allocare sono:

$$n = \frac{1 \text{ MHz}}{(30 + 3) \text{ kHz}} = 30$$

La tensione in ciascuna delle bande laterali vale:

$$\frac{m_a \cdot V_p}{2} = \frac{k \cdot V_m}{2}$$

con  $V_p$  e  $V_m$ , valori efficaci rispettivamente della portante e della modulante.

Dalla potenza sviluppata sul carico da 75  $\Omega$  in una delle bande laterali:

$$P_l = \left( \frac{m_a \cdot V_p}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{R_l}$$

si può risalire al valore efficace della portante:

$$V_p = \frac{2 \cdot \sqrt{P_l \cdot R_l}}{m_a} = \frac{2 \cdot \sqrt{10 \cdot 75}}{0,5} = 109,54 \text{ V}$$

e alla potenza sviluppata dalla sola portante:

$$P_p = \frac{V_p^2}{R_l} = \frac{109,54^2}{75} = 160 \text{ W}$$

La potenza totale vale quindi:

$$P_{\text{tot}} = P_p + 2 \cdot P_l = 160 + 2 \cdot 10 = 180 \text{ W}$$

### ESERCIZIO 7



Si vogliono trasmettere più segnali con banda 12 kHz, modulati AM con indice di modulazione  $m_a = 0,8$ , su un canale di banda 100 kHz. Determinare il numero di canali allocabili in FDM, lasciando almeno 1 kHz di separazione tra le bande. Sapendo che la potenza di una banda laterale vale  $P_l = 8$  W e che il carico ( $R_l$ ) è da 50  $\Omega$ , calcolare l'ampiezza della portante e la potenza totale di ciascun canale.

[Ris.:  $n = 3$ ;  $V_p = 50$  V;  $P_{\text{tot}} = 66$  W]

### ESERCIZIO SVOLTO G



Si vogliono trasmettere più segnali audio con banda 15 kHz, modulati FM con indice di modulazione  $m_f = 6$ , su un canale di banda 1 MHz. Determinare il numero di canali allocabili in FDM.

#### SOLUZIONE

$$\Delta f = m_f \cdot f_m = 6 \cdot 15 \text{ kHz} = 90 \text{ kHz}$$

$$B = 2 \cdot (\Delta f + f_m) = 2 \cdot (90 + 15) = 210 \text{ kHz}$$

Il numero di canali allocabili in FDM vale:

$$n \leq \frac{1 \text{ MHz}}{210 \text{ kHz}} = 4,76$$

Si hanno, dunque, 4 canali, mentre il resto è riservato alla separazione tra bande adiacenti.

### ESERCIZIO 8



Si vogliono trasmettere più segnali con banda 12 kHz, modulati FM con indice di modulazione  $m_f = 4$ , su un canale di banda 500 kHz. Determinare il numero di canali allocabili in FDM.

[Ris.:  $n = 4$ ]

### ESERCIZIO SVOLTO H



Determinare la composizione armonica di una portante digitale costituita da un treno di impulsi di frequenza 5 MHz, durata  $\tau = t_{\text{on}} = 0,05 \mu\text{s}$  e ampiezza 2 V.

#### SOLUZIONE

Trattandosi di un impulso periodico, con periodo:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{5 \text{ MHz}} = 0,2 \mu\text{s}$$

lo spettro risulta composto da un valor medio:

$$V_0 = A \cdot \frac{\tau}{T} = 2 \text{ V} \cdot \frac{0,05 \mu\text{s}}{0,2 \mu\text{s}} = 0,5 \text{ V}$$

e da una serie di armoniche:

$$V_n = 2A \cdot \frac{\tau}{T} \cdot \frac{\sin n\pi \cdot \frac{\tau}{T}}{n\pi \cdot \frac{\tau}{T}} = \frac{2A}{n\pi} \cdot \sin\left(n\pi \cdot \frac{\tau}{T}\right)$$

il cui inviluppo ha un andamento del tipo  $\frac{\sin x}{x}$  e passa per zero ogni multiplo di:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{0,05 \mu\text{s}} = 20 \text{ MHz}$$

Considerato che:

$$\frac{\tau}{T} = \frac{0,05 \mu\text{s}}{0,2 \mu\text{s}} = 0,25 = \frac{1}{4}$$

si ottengono le seguenti armoniche:

- prima armonica,  $f_1 = 5$  MHz:

$$V_1 = \frac{2 \cdot 2}{\pi} \cdot \sin\left(\pi / 4\right) = 0,90 \text{ V}$$

- seconda armonica,  $f_2 = 10$  MHz:

$$V_2 = \frac{2 \cdot 2}{2\pi} \cdot \sin\left(2\pi / 4\right) = 0,64 \text{ V}$$

- terza armonica,  $f_3 = 15$  MHz:

$$V_3 = \frac{2 \cdot 2}{3\pi} \cdot \sin\left(3\pi / 4\right) = 0,30 \text{ V}$$

- quarta armonica,  $f_4 = 20$  MHz:

$$V_4 = \frac{2 \cdot 2}{4\pi} \cdot \sin\left(4\pi / 4\right) = 0 \text{ V}$$

e successive.

### ESERCIZIO SVOLTO I



Determinare il bit rate ammissibile per un canale con banda  $B = 3.100$  Hz e codifica su 256 livelli. Qual è il rapporto S/N minimo necessario per sostenerlo?

#### SOLUZIONE

Il bit rate è dato dalla:

$$C = 2 \cdot B \cdot \log_2 L = 2 \cdot 3.100 \cdot \log_2 256 = 49.600 \text{ bps}$$

Il rapporto S/N si può ricavare dalla:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

$$49.600 = 3.100 \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

$$1 + \frac{S}{N} = 2^{\frac{49.600}{3.100}} = 2^{16} = 65.536$$

$$\left. \frac{S}{N} \right|_{\text{dB}} = 10 \cdot \log_{10} 65.536 = 48,16 \text{ dB}$$

### ESERCIZIO 9



Determinare il bit rate di un canale con banda  $B = 1.200$  Hz e codifica su 16 livelli.

[Ris.: 9.600 bps]



### ESERCIZIO SVOLTO J

●●○

Determinare la capacità di canale  $C$  e il numero di livelli ammissibili per la banda telefonica ( $B=3.100$  Hz), in presenza di un rapporto  $S/N=18$  dB.

#### SOLUZIONE

In presenza di un rumore tale che:

$$\frac{S}{N} = 10^{\frac{18}{10}} = 63,1$$

$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) = 3.100 \cdot \frac{\log_{10} 64,1}{\log_{10} 2} = 18.607 \text{ bps}$$

$$L_{\max} = \sqrt{1 + \frac{S}{N}} = \sqrt{1 + 63,1} = 8$$

Difatti, con  $L=8$ , utilizzando la relazione del canale privo di rumore si ha:

$$C = 2 \cdot B \cdot \log_2 L = 2 \cdot 3.100 \cdot \log_2 8 = 18.600 \text{ bps}$$

### ESERCIZIO 10

●●○

Determinare la capacità di canale  $C$  per la banda telefonica ( $B=3.100$  Hz), nei casi di trasmissione binaria in assenza di rumore e di trasmissione multilivello in presenza di un rapporto  $S/N=20$  dB.

[Ris.: con trasmissione binaria  $C=6.200$  bps; con trasmissione multilivello in presenza di rumore  $L_{\max}=10$ , che non è una potenza del 2, perciò si scende a  $L=8=2^3$ ,  $C=18,6$  kbps]

### ESERCIZIO 11

●●○

Determinare la capacità di canale TV satellitare con banda video  $B=10$  MHz e un rapporto  $S/N=20$  dB.

[Ris.:  $C=66$  Mbps]

### ESERCIZIO SVOLTO K

●●○

Dato un sistema di trasmissione dati con modulazione di ampiezza ASK OOK, con  $t_b=1$  ms e periodo della portante  $T_p=0,2$  ms, calcolare la velocità di trasmissione, la frequenza della portante e la banda occupata.

#### SOLUZIONE

La velocità di trasmissione vale:

$$f_b = \frac{1}{t_b} = 1.000 \text{ bit/s}$$

La frequenza della portante è:

$$f_p = \frac{1}{T_p} = 5.000 \text{ Hz}$$

La banda di un segnale modulato ASK, come nella AM, vale due volte la frequenza di bit, allocata attorno alla portante:

$$B = 2 \cdot f_b = 2.000 \text{ Hz}$$

### ESERCIZIO 12

●○○

Un segnale dati, costituito da un'onda quadra  $0 \div 5$  V, modula a  $1.200$  bit/s una portante sinusoidale di ampiezza  $1$  V e periodo  $0,1$  ms, effettuando una modulazione digitale ASK OOK. Indicare il contenuto armonico del segnale modulato e il valore della banda occupata.

[Ris.: coppie di righe centrate attorno a  $10$  kHz, con ampiezza  $A_1=5/\pi$ ;  $A_3=5/3\pi$ ;  $B=2.400$  Hz]

### ESERCIZIO SVOLTO L

●○○

Una portante sinusoidale di frequenza  $50$  MHz viene modulata con un'onda quadra di frequenza  $f=2$  kHz. Data la massima deviazione di frequenza  $\Delta f=20$  kHz, calcolare l'indice di modulazione, le frequenze minima e massima e la banda passante, considerando solo il 1° lobo dello spettro.

#### SOLUZIONE

L'indice di modulazione vale:

$$m_f = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{20 \text{ kHz}}{2 \text{ kHz}} = 10$$

La frequenza minima vale:

$$f_{\min} = 50.000 \text{ kHz} - 20 \text{ kHz} = 49.980 \text{ kHz}$$

La frequenza massima vale:

$$f_{\max} = 50.000 \text{ kHz} + 20 \text{ kHz} = 50.020 \text{ kHz}$$

Nota la banda del 1° lobo dello spettro:

$$f_b = 2 \cdot f = 4 \text{ kHz}$$

si ottiene la banda passante:

$$B = f_{\max} - f_{\min} + 2 \cdot f_b = 40 \text{ kHz} + 8 \text{ kHz} = 48 \text{ kHz}$$

### ESERCIZIO 13

●○○

Un segnale dati, costituito da un'onda quadra, modula in frequenza (FSK) a  $800$  bit/s una portante sinusoidale di periodo  $0,1$  ms, con  $\Delta f=1.000$  Hz. Determinare il valore sia delle frequenze  $f_{\min}$  e  $f_{\max}$ , sia della banda passante, considerando solo il primo lobo dello spettro della quadra.

[Ris.:  $f_{\min}=9$  kHz;  $f_{\max}=11$  kHz;  $B=3,6$  kHz]

### ESERCIZIO SVOLTO M

●○○

Determinare il bit rate di un modem fonico che lavora con velocità di modulazione  $2.400$  baud, operando su  $64$  livelli e adottando un protocollo di compressione dei dati in ingresso con efficienza  $200\%$ .

#### SOLUZIONE

Operando su  $64$  livelli, ciascun livello trasporta  $6$  bit di informazione ( $2^6 = 64$ ). Considerando anche la compressione, il bit rate vale:

$$2.400 \cdot 6 \cdot 2 = 28.800 \text{ bps}$$

### ESERCIZIO 14

●○○

Determinare il bit rate di un modem che lavora con velocità di modulazione  $1.200$  baud, operando su  $128$  livelli e adottando un protocollo di compressione dei dati in ingresso con efficienza  $150\%$ .

[Ris.:  $12.600$  bps]

### ESERCIZIO SVOLTO N

●○○

Una sorgente emette un flusso binario con rate  $f_b=1$  Mbps, successivamente filtrato mediante un formatore di impulsi a coseno rialzato con roll-off  $\alpha=0,8$ . Determinare la banda bilatera occupata dal segnale dati.

#### SOLUZIONE

Nel caso di alfabeto binario, il baud rate dei simboli in trasmissione coincide con il bit rate della sorgente.

L'utilizzo di un formatore di impulsi a coseno rialzato riduce la banda bilatera complessiva del segnale dati al valore:

$$B = f_b \cdot (1 + \alpha) = 1 \text{ Mbps} \cdot (1 + 0,8) = 1,8 \text{ MHz}$$

### ESERCIZIO SVOLTO O

●○○

Per realizzare un collegamento da  $100$  kbps con un BER migliore di  $10^{-3}$ , si utilizza un modulatore  $32$  QAM con filtro a coseno rialzato  $\alpha=0,5$ . Determinare il rapporto segnale rumore minimo necessario.

#### SOLUZIONE

Utilizzando la tecnica  $32$  QAM, ogni simbolo porta  $5$  bit di informazione e la banda traslata bilatera, occupata dopo il processo di modulazione, diventa:

$$B_w = \frac{f_b \cdot (1 + \alpha)}{5} = \frac{100 \text{ kbps} \cdot (1 + 0,5)}{5} = 30 \text{ kHz}$$

Dal grafico di fig. 40 a pag. 409, per un BER  $< 10^{-3}$  risulta una richiesta di energia per bit ( $E_b$ ), rispetto alla densità di potenza di rumore:

$$\frac{E_b}{N_0} = 21 \text{ dB} = 125,9$$

perciò un rapporto segnale rumore:

$$\text{SNR} = \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{R}{B_w} = 125,9 \cdot \frac{100 \text{ kbps}}{30 \text{ kHz}} = 419,7 = 26,2 \text{ dB}$$

### ESERCIZIO 15

●○○

Per realizzare un link da  $200$  kbps con un BER migliore di  $10^{-4}$ , si utilizza un modulatore  $32$  QAM con filtro a coseno rialzato  $\alpha=0,8$ . Determinare il rapporto segnale-rumore minimo necessario.

[Ris.: SNR = 23,4 dB]

### ESERCIZIO SVOLTO P

●○○

Si vuole scaricare da Internet un video a colori di  $30$  s, in formato CIF ( $360 \cdot 288$  pixel),  $3$  frame/s,  $3$  colori da  $4$  bit ciascuno ( $2^{12} = 4.096$  colori), compresso al  $50\%$ , utilizzando un modem analogico su linea vocale con  $S/N=36$  dB oppure un modem ADSL a  $640$  kbps. Determinare il tempo impiegato nei due casi.

#### SOLUZIONE

La massa totale di informazioni da scaricare vale:

$$(360 \cdot 288) \text{ pixel} \cdot 3 \frac{\text{colori}}{\text{pixel}} \cdot 4 \frac{\text{bit}}{\text{colore}} \cdot 3 \frac{\text{frame}}{\text{s}} \cdot 30 \text{ s} \cdot 50\% = 56 \text{ Mbit}$$

Utilizzando un modem analogico su canale telefonico ( $B=3.100$  Hz), in presenza di rumore tale che  $S/N=36$  dB:

$$\frac{S}{N} = 10^{\frac{36}{10}} = 3.981$$

la capacità di canale vale:

$$C = B \cdot \log_2 (1 + 3.981) = 3.100 \cdot \log_2 3.982 = 37.073 \text{ [bit/s]}$$

Il numero di bit per ogni livello può essere:

$$n = \frac{C}{2 \cdot B} = \frac{37.073 \text{ bit/s}}{6.200 \text{ baud}} \approx 6 \frac{\text{bit}}{\text{livello}}$$

cioè è possibile una codifica fino a  $2^6=64$  livelli differenti, quale la  $64$  QAM PSK, a  $38,4$  kbps.

Il tempo impiegato per scaricare il filmato vale:

$$t = \frac{56 \text{ Mbit}}{38,4 \text{ kbps}} = 1.458 \text{ s} \approx 24 \text{ minuti}$$

Con una connessione ADSL a  $640$  kbps il tempo impiegato si riduce a:

$$t = \frac{56 \text{ Mbit}}{640 \text{ kbps}} = 87,5 \text{ s}$$

# Laboratori delle competenze

## 7 Modulazioni analogiche e digitali

### SCHEDA 1 Prove sulla modulazione AM

Si vogliono sperimentare in simulazione le caratteristiche di un segnale modulato in ampiezza.

#### Segnale modulato AM

Selezionare tra i componenti il generatore Source → Signal\_Voltage\_Source → AM\_Voltage con ampiezza 10 V, portante 100 kHz, modulante 1 kHz e indice di modulazione 0,5 (fig. 1).

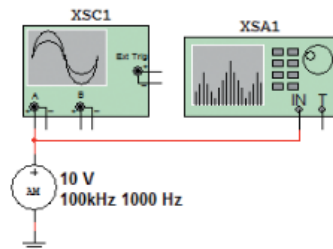


Fig. 1. Segnale modulato AM.

Analizzare la forma d'onda generata, mediante un oscilloscopio con base tempi 1 ms/div, e lo spettro relativo, attraverso un analizzatore impostato come indicato in fig. 2.

Tra quali estremi si muove la forma d'onda sull'oscilloscopio? Perché? Cosa succede aumentando l'indice di modulazione, impostando, per esempio,  $m = 0,8$ ? Osservando lo spettro del segnale, quanto valgono le componenti armoniche attorno alla portante da 100 kHz? E con  $m = 0,8$ ?

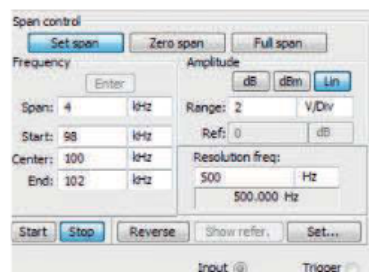


Fig. 2. Impostazioni per l'analizzatore di spettro.

#### Rivelatore a diodo

Per rilevare l'involuppo del segnale modulato, è richiesto un circuito a carica rapida e scarica lenta, perciò un condensatore con diodo di carica e una resistenza di scarica, tale che:

$$R \cdot C \approx \frac{1}{2\pi \cdot f_m}$$

con  $f_m$  che rappresenta la frequenza della modulante. Visualizzare la forma d'onda ricostruita con il circuito in fig. 3. Modificare il valore della resistenza con 10 kΩ e 1 MΩ e commentare i risultati.

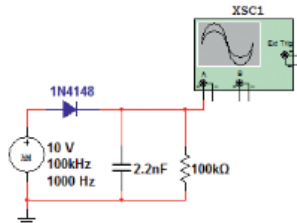


Fig. 3. Rivelatore a diodo.

#### Trasmissione DSB

Il segnale AM utilizzato nell'esperienza precedente presenta sia la portante, sia le due bande laterali; con la portante che racchiude la maggior parte della potenza del segnale.

Per eliminare la portante e ottenere una trasmissione DSB (Double Side Band), si può utilizzare un moltiplicatore analogico. Comporre pertanto il circuito in fig. 4, scegliendo il moltiplicatore reperibile in Source → Control\_Function\_Blocks ed entrare in simulazione con le impostazioni di fig. 5.

Come risulta il segnale nel tempo? E lo spettro?

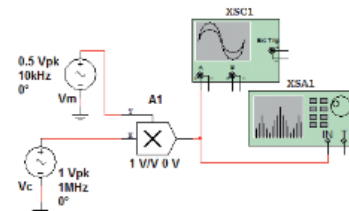


Fig. 4. Moltiplicatore analogico.

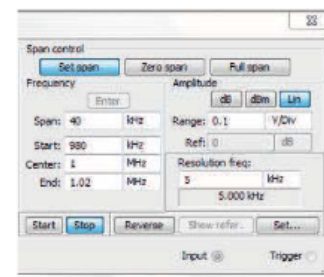


Fig. 5. Impostazioni per l'analizzatore di spettro.

### SCHEDA 2 Prove sulla modulazione FM

Si vogliono sperimentare in simulazione le caratteristiche di un segnale modulato in frequenza.

#### VCO

Per comprendere il comportamento della modulazione di frequenza, si può utilizzare un oscillatore controllato in tensione (VCO) pilotato con un segnale variabile.

Comporre quindi il circuito in fig. 6, selezionando il componente Source → Controlled\_Voltage\_Sources → Voltage\_Controlled\_Sine\_Wave.

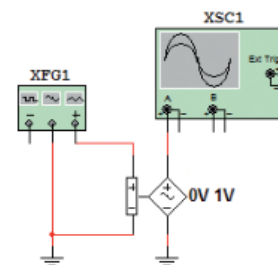


Fig. 6. VCO.

Impostare il generatore di funzioni per onda triangolare:  $f = 100$  Hz;  $V_p = 4$  V; offset = 5 V; d.c. = 50%; in modo da ottenere una tensione che varia lentamente tra 1 V e 9 V.

Impostare la tabella del VCO per 0 V → 100 Hz; 10 V → 10 kHz, e attivare la simulazione.

Come si presenta il segnale nel tempo? Perché? Sostituire il generatore di funzioni con un potenziometro (fig. 7) e osservare la forma d'onda prodotta dal VCO variando la posizione del cursore.

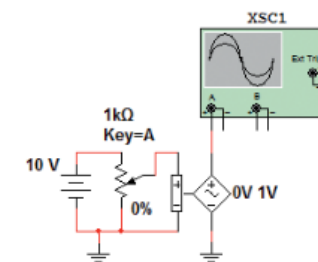


Fig. 7. Controllo mediante potenziometro.

#### Deviazione di frequenza

Nella modulazione FM, la deviazione di frequenza rappresenta l'entità dello scostamento della frequenza del segnale modulato rispetto alla frequenza portante, mentre l'indice di modulazione ( $m$ ) è il rapporto tra il valore della deviazione ( $\Delta f$ ) e la frequenza della modulante ( $f_m$ ):

$$m = \Delta f / f_m$$

Rispetto all'unica coppia spettrale presente nella AM, in FM le coppie spettrali attorno alla portante sono infinite, con potenza che decresce allontanandosi dalla portante.

Considerando solo quelle con ampiezza fino a -20 dB rispetto alla più alta, queste racchiudono il 98% della potenza totale del segnale modulato. Il numero delle copie significative aumenta con la profondità di modulazione; per esempio, con  $m = 3$  si hanno 6 coppie significative:

$$\Delta f = m \cdot f_m$$

Comporre il circuito in fig. 8, con il generatore FM di ampiezza 10 V, portante 100 kHz, modulante 5 kHz, coefficiente di modulazione  $m = 3$ , selezionandolo in Sources → Signal\_Voltage\_Sources → FM\_Voltage.

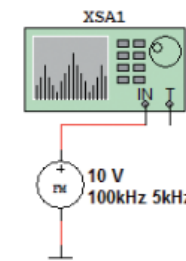


Fig. 8. Generatore FM.