ACCADEMIA NAVALE

A.N. 4-43

NOZIONI DI RADIOTECNICA

A cura del C.V. (AN) Raffaele AZZARONE



POLIGRAFICO ACCADEMIA NAVALE LIVORNO - 2003

		I	
		3"	
(F	INDICE		9
e s	PDEMMESSA	pag.	1
- <u>I</u>	PREMESSA GENERALITA SULLA MODULAZIONE	pag.	2
1 9	MODULAZIONI DI PORTANTI SINUSOIDALI	pag.	5
2 1	a Modulazione di ampiezza	. pag.	6
Pr	b Modulazione di frequenza	, pag.	16
	c Modulazione di fase	. pag.	22
	CANALIZZAZIONE DELLE EMISSIONI	. pag.	25
3	a Canali AM ed FM	. pag.	25
	a Canali AM ed frb Considerazioni energetiche sulla modulazione di ampiezza	. pag.	27
	b Considerazioni energetiche sulla modulazione AM compatibile	. pag.	29
	d Modulazione in banda laterale unica Single Side Band (SSB)	. pag.	31
	d Modulazione in banda laterale dilute la	. pag.	. 36
4	a Generalità	. pag.	. 36
	a Generalita b Principio di funzionamento del trasmettitore	. pag.	. 37
	c Selezione dei canali	. pag.	. 39
	d Caratteristiche principali	. pag.	. 42
	d Caratteristiche principali IL RICEVITORE	pag	. 48
5. ^	a Generalità	pag	. 48
	b Principio di funzionamento del trasmettitore	pag	. 48
er un	b Principio di funzionamento del trasmettro. c Il ricevitore supereterodina	pag	. 50
	d Il rivelatore AM	pag	, 55
	d Il rivelatore AM	pag	. 57
	e Il discriminatore FM	pag	. 58
	f Caratteristiche principali PRINCIPALI TIPI DI EMISSIONE	pag	. 66
0. =	a Radiotelegrafia Morse	pag	. 66
	b Radiotelegrafia con telescrivente	pag	,. 70
	c Fonia	pag	;. 82
	d Trasmissione dati	pag	. 84
	a - Designazione delle classi di emissione	pag	s. 94

CENNI SULLE ANTENNE	pag. 95
014th 50222	pag. 95
a Generalita	nag. 95
b L' elemento antenna	100
c Il dipolo hertziano	pag.100
d Il monopolo marconiano	pag.102
e Guadagno dell'antenna trasmittente	pag.106
f Area equivalente dell'antenna ricevente	pag.109
g Rendimento	pag.110
h Selettività dell'antenna	pag.111
i Antenne a schiera	pag.120
APPENDICE 1 - DESIGNAZIONE INTERNAZIONALE DELLE EMISSIONI	
PER RADIOCOMUNICAZIONI	pag.122
APPENDICE 2 - REGOLE PRATICHE PER L'IMPIEGO DEI DECIBEL	pag.127
	25
RTRITOGRAFTA	pag.134
	a Generalità b L' elemento antenna c Il dipolo hertziano d Il monopolo marconiano e Guadagno dell'antenna trasmittente f Area equivalente dell'antenna ricevente g Rendimento h Selettività dell'antenna i Antenne a schiera APPENDICE 1 - DESIGNAZIONE INTERNAZIONALE DELLE EMISSIONI PER RADIOCOMUNICAZIONI APPENDICE 2 - REGOLE PRATICHE PER L'IMPIEGO DEI DECIBEL BIBLIOGRAFIA

PREMESSA

Il presente lavoro è rivolto a coloro che per la prima volta si avvicinano alla vasta ed interessante materia della "Radiotecnica".

L'argomento pertanto è stato sviluppato in maniera semplificata e descrittiva riducendo al minimo indispensabile l'impiego di complesse formulazioni matematiche.

Il lavoro oltre alle definizioni di base sui differenti tipi di modulazione ed emissione comprende alcuni cenni sulla costituzione dei trasmettitori e ricevitori ed alcuni elementi sulle antenne.

In appendice infine si è ritenuto opportuno riportare un prospetto sull'impiego pratico dei decibel che può tornare di comodo impiego anche per altre discipline.

E' appena il caso di ricordare che in materia di radiotecnica esistono numerose pubblicazioni specifiche, nella bibliografia sono stati riportati, per brevità, solo quelli consultati per la elaborazione del presente testo.

Ritengo opportuno ringraziare, per la validissima collaborazione fornita, il personale del Gruppo Insegnamento TLC/SIOC, del Reparto TLC di Mariteleradar e del Poligrafico dell'Accademia Navale.

C.F. (AN) Raffaele AZZARONE
Raffaule AOUN

1. - GENERALITA' SULLA MODULAZIONE

- Con il termine "modulazione" si intende la variazione di una grandezza fisica in dipendenza di una informazione che si vuol trasmettere.

A titolo di esempio si pensi alla voce la quale scaturisce dalla deformazione che denti, labbra, lingua, etc. provocano sul flusso d'aria fornito dai polmoni; oppure al principio di funzionamento del telefono ove le variazioni della resistenza del microfono (causate dalla voce) modificano la corrente circolante nella linea.

In pratica quando si vuol inviare una informazione, dato un certo tipo di mezzo di comunicazione, si fa variare una grandezza fisica che può propagarsi in questo mezzo secondo la legge stabilita dalla informazione stessa.

Ad esempio due persone vicine potranno usare le deformazioni dell'aria (suoni) per comunicare, se invece sono distanti potranno collegarsi via filo modificando le correnti elettriche in esso circolanti oppure, se sono notevolmente lontane l'une dall'altre potranno modulare (cioè far variare) i parametri caratteristici di onde elettromagnetiche di idonea frequenza.

Da quanto fin qui detto si può concludere che per trasmettere un segnale di informazione, è necessario poter disporre:

- di un idoneo mezzo trasmissivo;
- (2) di una grandezza fisica da modulare, che ha quindi solo la funzione di portare la informazione e che prende quindi il nome di portante;

(3) - della informazione vera e propria che dovrà essere messa in forma tale da poter modulare la portante, e che prende il nome di modulante.

Pertanto il segnale complessivo trasmesso sarà costituito da una portante + una modulante.

All'atto della ricezione l'informazione inviata viene estratta dal segnale trasmesso separando la modulante dalla portante; tale processo inverso prende il nome di demodulazione.

Il concetto di portante ed informazione modulante può essere ulteriormente esemplificato prendendo in considerazione la spedizione di una lettera, in cui la lettera costituisce il messaggio utile mentre il treno ha solo la funzione di trasporto da chi trasmette a chi riceve.

b. - Per quanto concerne la disciplina della "Radiotecnica", ci occuperemo ovviamente solo di quelle trasmissioni di messaggi che avvengono per mezzo di onde radio.

In altre parole prenderemo in considerazione due punti distanti con interposta aria (o vuoto) come mezzo trasmissivo, e quindi utilizzeremo onde elettromagnetiche di idonea frequenza come portanti.

Il segnale modulante sarà costituito, nel caso della voce, dalle frequenze foniche che andranno a modulare l'onda E.M. e cioè, come meglio si vedrà in seguito, a variare le caratteristiche dell'onda portante.

c. - Il processo sopradescritto di modulazione di una frequenza portante con altre frequenze modulanti potrebbe far insorgere il dubbio sulla effettiva necessità di tale operazione. Difatti mentre risulta evidente che per trasmettere una lettera è necessario un mezzo di trasporto adeguato (ad es. il treno), si potrebbe d'altra parte pensare che sarebbe sufficiente convertire le frequenze acustiche in frequenze elettromagnetiche affinchè queste da sole siano in grado di propagarsi per lunghe distanze.

Tecnicamente questo è possibile, basti pensare alle notevoli portate ottenibili con le onde e.m. di frequenza corrispondente a quella delle onde acustiche e cioè le ELF (30 - 300 Hz), le VF o ULF (300 - 3000 Hz) e le VLF (3 - 30 KHz).

In pratica però tali bande non vengono impiegate per trasmettere segnali fonici per svariati motivi, tra i più importanti si segnalano i due sottoriportati.

 Si supponga, per semplicità, di voler trasmettere un segnale costituito da un singolo tono ad es. di l KHz, tramutandolo in onda e.m.

La lunghezza d'onda corrispondente ad 1 KHz è di 300 Km, per cui si dovrebbero utilizzare antenne lunghe diverse decine di Km.

Se invece con il tono di l KHz si modula una portante ad es. di 10 MHz, la lunghezza dell'onda e.m. risulta questa volta di 30 m per cui saranno sufficienti antenne di una decina di metri di lunghezza.

(2) Supponiamo inoltre che vi siano altre stazioni, oltre alla nostra, a voler effettuare una trasmissione dello stesso tipo e cioè di un tono di 1 KHz.

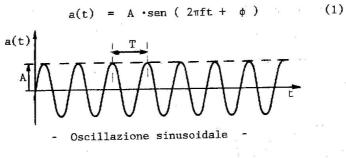
Nel caso di trasmissione diretta le varie emissioni di 1 KHz si sovrapporrebbero interferendo le une con le altre, ed i ricevitori non riuscirebbero a riconoscere la trasmissione desiderata.

Impiegando invece la tecnica della modulazione, una emissione potrebbe essere effettuata modulando 10 MHz, un'altra modulando 11 MHz, un'altra ancora 12 MHz e così via, in tal modo tutte le emissioni risultano ben distinguibili e separate tra di loro.

Pertanto al ricevitore sarà sufficiente sintonizzarsi su 10 MHz, oppure 11 MHz o 12 MHz, etc., per poter ascoltare la stazione desiderata.

2. - MODULAZIONE DI PORTANTI SINUSOIDALI

Una generica oscillazione sinusoidale (Fig. 1) può essere rappresentata nelle seguente forma:



- Fig. 1 -

dove:

A - rappresenta l'ampiezza massima dell'onda;

f - rappresenta la frequenza (f =1/T);

φ - rappresenta la fase.

Volendo utilizzare questa oscillazione come portante per trasmettere una informazione, opportunamente trasdotta in segnale elettrico, è necessario far variare uno dei sopraelencati parametri in maniera proporzionale alla intensità del segnale di informazione.

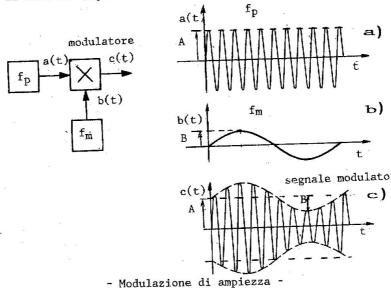
Pertanto sono possibili tre differenti tipi di modulazione:

- la modulazione di ampiezza
- II) <u>la modulazione di frequenza</u>
 - III) <u>la modulazione di fase</u>

a. - Modulazione di ampiezza

(1) Modulare in ampiezza una oscillazione a radiofrequenza (R.F.) significa far variare l'ampiezza A con la stessa legge del segnale di informazione.

Utilizzando la terminologia anglosassone la tecnica prende il nome di "Amplitude Modulation", abbreviato AM.



- Fig. 2 -

Se prendiamo come portante l'oscillazione a R.F. di Fig. 2.a. e come segnale di informazione (modulante) una semplice sinusoide come quella rappresentata in Fig. 2.b, a seguito della operazione di modulazione di ampiezza si avrà come risultante il segnale in Fig. 2.c.

Con la modulazione di ampiezza quindi l'inviluppo della portante viene fatto variare in maniera identica all'andamento del segnale modulante.

In altre parole l'ampiezza massima dell'oscillazione, che in assenza di modulazione aveva valore costante A, varia con la legge sinusoidale del segnale modulante.

L'operazione di modulazione comporta inoltre anche la variazione dell'inviluppo dei massimi negativi dell'oscillazione con la stessa legge della modulante in maniera però speculare rispetto all'inviluppo dei massimi positivi.

Per motivi di chiarezza grafica, la f_p di Fig. 2 è circa 10 volte maggiore di f_m ; è opportuno comunque fin d'ora evidenziare che, affinchè il ricevitore sia in grado di separare fedelmente la modulante dalla portante, <u>la f_p deve sempre essere molto maggiore di f_m (indicativamente almeno 100 volte).</u>

(2) Il rapporto tra l'ampiezza "B" del segnale modulante e l'ampiezza "A" della portante si indica con :

$$m = \frac{B}{A} \tag{2}$$

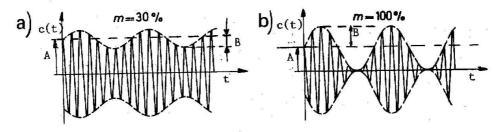
e prende il nome di indice o grado di modulazione.

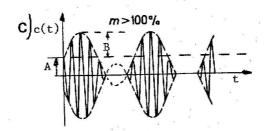
Generalmente però si preferisce indicare il grado di modulazione in percento per cui si avrà:

$$m = \frac{B}{A} \cdot 100$$

In tal caso "m" prende il nome di profondità di modulazione.

In Fig. 3 sono riportati tre esempi di modulazione con m = 30% , m = 100% ed m > 100%





- Fig. 3 -

Come si può facilmente rilevare, affinchè in ricezione si possa estrarre fedelmente il segnale modulante, l'ampiezza "B" deve essere < A (m < 100%).

Nel caso invece di B > A (m > 100%) (Fig. 3.c.), si dice che la portante è <u>sovramodulata</u>, il che comporta la distorsione del segnale trasmesso.

Nei moderni trasmettitori radio allo scopo di evitare i fenomeni di sovramodulazione vi sono degli appositi circuiti di protezione che limitano l'ampiezza del segnale modulante per una modulazione massima del 90%.

Se da un lato per evitare la sovramodulazione è opportuno impiegare indici di modulazione non superiori al 90% dall'altra non è conveniente utilizzare indici di modulazione troppo bassi in quanto il ricevitore potrebbe non distinguere chiaramente le variazioni di ampiezza della portante modulata.

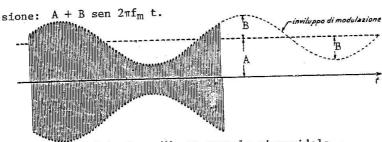
(3) Per esaminare analiticamente il processo di modulazione di ampiezza riprendiamo in esame l'espressione (1) riferendola all'oscillazione di una portante di frequenza f_p , supponendo, per semplicità, fase iniziale $\phi = 0$, si avrà:

$$a(t) = A sen(2\pi f_p t).$$

Se moduliamo l'ampiezza di questa onda con un segnale modulante che inizialmente supporremo sinusoidale, rappresentato da:

$$b(t) = B sen(2\pi f_m t);$$

l'ampiezza massima dell'onda modulata risultante varierà attorno al valore massimo della portante "A" (Fig. 4) e <u>l'invi-luppo di modulazione</u> sarà rappresentato dalla seguente espres-



- Modulazione AM con segnale sinusoidale -- Fig. 4 -

Pertanto l'espressione della oscillazione \boldsymbol{f}_p modulata dal segnale sinusoidale \boldsymbol{f}_m sarà dato da:

$$a(t) = (A+B \sin 2\pi f_m t) \cdot \sin 2\pi f_p t$$
 (3)

ricordando che B = m A la (3) diviene:

$$a(t) = A (1 + m sen2\pi f_m t) \cdot sen2\pi f_p t =$$

$$= Asen2\pi f_p t + mAsen2\pi f_p t \cdot sen2\pi f_m t .$$

Applicando le formule trigometriche di Werner e degli angoli associati si può ricavare la seguente espressione finale dell'onda modulata:

$$a(t) = A \operatorname{sen2\pi f}_{p} t + \frac{mA}{2} \operatorname{sen} \left[2\pi (f_{p} - f_{m}) t + \frac{\pi}{2} \right] + \frac{mA}{2} \operatorname{sen} \left[2\pi (f_{p} + f_{m}) t - \frac{\pi}{2} \right]. (4)$$

Come si può facilmente dedurre dalla (4), un'oscillazione modulata in ampiezza sinusoidalmente può considerarsi la somma di tre oscillazioni sinusoidali denominate : oscillazione portante, oscillazione laterale inferiore ed oscillazione laterale superiore, le cui caratteristiche sono:

AMPIEZZ	A FREQUENZA	FASE
Oscill. Portante A	fp	0
Oscill. Laterale inf. mA 2	f _p -f _m	<u>π</u> -2
Oscill. Laterale sup. m A 2	$f_p + f_m$	$-\frac{\pi}{2}$

La rappresentazione delle tre forme d'onda componenti é rappresentata in fig. 5 (a), (b) e (c).

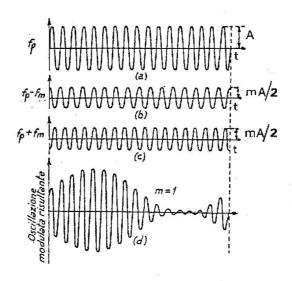


Fig. 5 - Oscillazioni componenti e oscillazione AM risultante.

Come si può facilmente rilevare, sommando istante per istante le tre oscillazioni componenti si ottiene (Fig. 5 (d)) la forma d'onda tipica della portante modulata in ampiezza da un tono sinusoidale.

E' opportuno a questo punto far osservare una importante caratteristica delle modulazioni di ampiezza e cioè quella che, qualunque sia la modulante, una delle oscillazioni componenti sarà di frequenza f ed ampiezza A, coincidente cioè con la portante in assenza di modulazione.

Si osservi inoltre che le ampiezze delle altre oscillazioni (mA/2) potranno al massimo raggiungere il valore di A/2, nella condizione di massima profondità di modulazione con m=1.

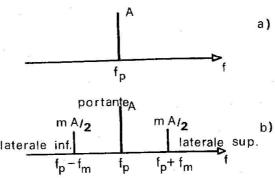
(4) La rappresentazione grafica con le <u>forme d'onda</u> (andamento delle ampiezze nel tempo) di Fig. 5, per indicare le componenti sinusoidali di un' onda modulata, risulta oltremodo scomoda e complessa.

Pertanto si preferisce impiegare la rappresentazione di tipo spettrale.

Lo <u>spettro</u> di un'onda si ottiene riportando sulle ascisse di un diagramma cartesiano il valore della frequenza e sulle ordinate l'ampiezza delle singole componenti.

Prendendo ad esempio una semplice oscillazione sinusoidale non modulata (f) questa sarà spettralmente rappresentata da un'unica riga (Fig. 6 a), la cui altezza dà il valore della massima ampiezza A, e la cui posizione sull'asse f dà il valore di frequenza f .

Peraltro tale rappresentazione non fornisce alcuna indicazione sulla fase.



- Rappresentazioni spettrali di un'onda non modulata (a) e di un'onda modulata in ampiezza sinusoidalmente (b).

Nel caso di una modulazione di ampiezza con un singolo tono, rappresentata in Fig. 5, lo spettro risulta composto da tre righe (Fig. 6 b), ciascuna caratterizzata dai valori di frequenza e di ampiezza di ogni singola oscillazione componente.

Dall'esame della Fig. 6 b é immediato rilevare la semplicità di rappresentazione grafica dello spettro delle oscillazioni modulate (1).

Trovano inoltre spiegazione le denominazioni di <u>laterale inferiore</u> e <u>laterale superiore</u> date alle due oscillazioni (f_p - f_m) e (f_p + f_m) in quanto queste risultano <u>simmetricamente</u> laterali rispetto alla riga della portante, una a frequenza più bassa, l'altra a fre-

quenza più alta.

NOTA (1) - Nelle misurazioni di laboratorio lo strumento impiegato per visualizzare le forme d'onda é <u>l'oscilloscopio</u>, mentre quello utilizzato per la rappresentazione spettrale si chiama <u>analizzatore di spettro</u>.

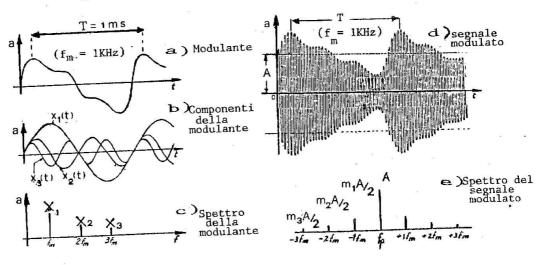
(5) Se la modulante anziche una semplice sinusoide fosse una generica funzione periodica (Fig. 7 a) questa potrebbe essere scomposta (utilizzando la serie di Fourier) in oscillazioni sinusoidali (Fig. 7 b), la prima delle quali viene chiamata fondamentale (x₁ (t)) e le altre armoniche (x₂ (t) e (x₃ (t)).

I valori di frequenza di queste ultime sono multipli interi della frequenza fondamentale (2 f_m , 3 f_m , etc.).

Per ciascuna di queste singole componenti sinusoidali si può ripetere quanto già detto in precedenza.

Pertanto ciascuna oscillazione componente modulerà la portante con il proprio indice di modulazione $m_1 = x_1/A$; $m_2 = x_2/A$; $m_3 = x_3/A$.

Il risultante spettro della oscillazione modulata sarà del tipo riportato in Fig 7-e; esso é costituito da tante coppie di righe simmetriche, rispetto alla portante, quante sono le componenti del segnale periodico f_m .



- Oscillazione modulata da un segnale periodico.

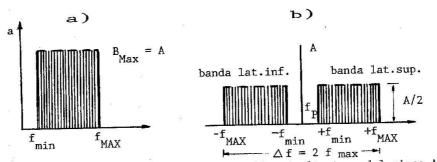
La distanza tra due righe successive é sempre pari alla frequenza della modulante periodica (ad es. 1 KHz).

(6) Nel caso della voce, o comunque di segnali non periodici, la scomposizione in oscillazioni sinusoidali può ugualmente essere effettuata.

Il numero delle componenti però può ritenersi infinito e le loro caratteristiche continuamente variabili nel tempo.

Lo spettro di tale modulazione sarà sempre del tipo riportato in Fig. 7 e) ma con numero di righe, e relative caratteristiche di frequenza ed ampiezza, in continua variazione.

A causa però sia della sua stessa natura sia del filtraggio di appositi circuiti, la modulante avrà componenti con frequenze comprese tra una f_{\min} ed una f_{\max} e con ampiezza limitata al massimo all'ampiezza "A" della portante, per evitare la sovramodulazione (Fig. 8 a).



- Spettro di un segnale non periodico e della risultante modulazione AM.
- Fig. 8 -

A seguito del processo di modulazione di ampiezza, lo spettro risultante sarà del tipo rappresentato in Fig. 8-b e cioè costituito dalla riga della portante e da due raggruppamenti di frequenze, che prendono il nome di <u>bande laterali</u>, disposte simmetricamente rispetto ad essa.

La <u>banda superiore</u> si estende da $(f_p + f_{min})$ a $(f_p + f_{MAX})$;

la <u>banda inferiore</u> si estende da $(f_p - f_{min})$ a $(f_p - f_{MAX})$. La massima ampiezza delle bande laterali é ovviamente A/2, in quanto ciascun indice di modulazione "m" di ogni componente potrà al massimo essere m=1.

Dato che la distanza di f da f é in pratica molto piccola generalmente si intende come:

- banda laterale superiore il complesso delle frequenze comprese tra

 $f_p = (f_p + f_{MAX});$

- banda laterale inferiore il complesso delle frequenze comprese tra

 $f_p = (f_p - f_{MAX}).$

L'intera estensione delle frequenze componenti da $(f_p - f_{MAX})$ a $(f_p + f_{MAX})$ prende il nome di <u>banda di modulazione o canale a radiofrequenza</u> (<u>Af</u>).

Come si può facilmente vedere per poter trasmettere correttamente in AM una comunicazione la cui massima frequenza componente ha valore f_{MAX} , occorre un canale, centrato su f, di larghezza $\Delta f = 2f_{MAX}$.

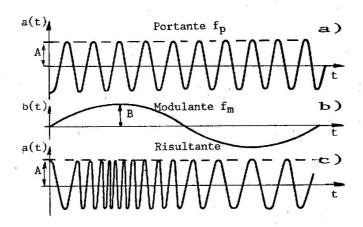
In altre parole, volendo ad esempio trasmettere una comunicazione in fonia della stessa qualità di quella telefonica, ove la f_{MAX} é limitata a 3KHz, occorrerebbe un canale a radiofrequenza largo almeno 6 KHz centrato sulla portante prescelta.

Se si volesse invece trasmettere musica ad alta fedeltà sarebbe necessario trasmettere anche le componenti di frequenza più elevata, ad esempio fino a 15 KHz; pertanto in tal caso occorrerebbe un canale a radiofrequenza di almeno 30KHz.

b. - Modulazione di frequenza

(1) Modulare in frequenza una oscillazione a radiofrequenza significa far variare la frequenza della portante, intorno al suo valore di riposo f_p , in maniera proporzionale all'ampiezza del segnale modulante f_m (fig. 9).

Utilizzando la terminologia anglosassone la tecnica prende il nome di "Frequency Modulation" (FM).



- Modulazione di frequenza - Fig. 9 -

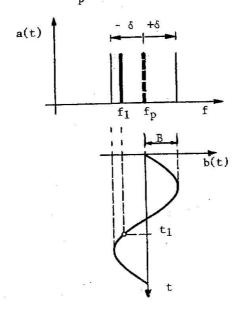
Come si può facilmente rilevare dalla Fig. 9, all'aumentare del segnale modulante aumenta il valore della frequenza della portante, mentre al diminuire della ampiezza di f_m , diminuisce il valore della frequenza rispetto ad f_p .

L'ampiezza della portante non subisce invece alcuna modifica rispetto all'onda non modulata.

(2) Nella modulazione di frequenza, la frequenza istantanea varia attorno al valore fisso della portante f proporzional-mente all'ampiezza della modulante, ossia:

$$f(t) = f_p + \delta$$

ove " $_{\delta}$ " rappresenta lo scarto massimo che "f" subisce rispetto al valore di \boldsymbol{f}_{p} .



- Variazione di frequenza in FM -

- Fig. 10 -

" 6" prende il nome di <u>deviazione di frequenza</u> ed ha il massimo valore in corrispondenza dei massimi del segnale modulante.

A differenza della modulazione di ampiezza, ove la ampiezza della portante non può essere fatta variare oltre un certo valore (B = A, m = 100%), nella modulazione di frequenza non esistono limiti teorici per quanto concerne la massima deviazione di frequenza.

(3) Dal punto di vista analitico, per rappresentare una oscillazione modulata in frequenza riprendiamo in considerazione l'espressione dell'oscillazione non modulata:

$$a(t) = A \cdot sen (2\pi f_p t + \phi) .$$

Per modulare in frequenza quest'onda con un segnale modulante, che inizialmente supporremo sinusoidale, rappresentato

$$b(t) = B \cdot sen (2\pi f_m t);$$

occorre far variare la f $_{\rm p}$ della prima espressione con la legge della modulante, in modo tale che l'ampiezza B fissi il massimo scarto (positivo e negativo) del valore istantaneo di frequenza da f $_{\rm p}$, e la frequenza f $_{\rm m}$ fissi il ritmo con cui avvengono le deviazioni.

In altre parole il dispositivo che realizza la modulazione di frequenza deve trasdurre le variazioni di ampiezza della modulante in variazioni di frequenza.

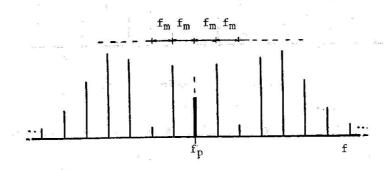
Da quanto sopradetto si può anche intuitivamente vedere come la risultante onda modulata in FM sia rappresentata da una funzione sinusoidale di un argomento anch'esso variabile sinusoidalmente nel tempo.

Scomponendo tale complessa espressione, a seguito di laboriosi passaggi matematici che non si ritiene opportuno riportare, si ottiene un numero infinito di oscillazioni componenti, di varia ampiezza e distanti in frequenza da $\, f_p \,$ di multipli interi (positivi e negativi) di $\, f_m \,$.

Lo spettro di una oscillazione FM pertanto risulta del tipo indicato in Fig. 11 ove, come si può rilevare, le righe laterali risultano simmetriche rispetto a \mathbf{f}_{p} .

Contrariamente alla AM, con la modulazione di frequenza la riga f non rimane di ampiezza inalterata rispetto al caso di assenza di modulazione, ma varia. In alcune condizioni può essere anche più bassa di altre righe o addirittura scomparire.

In altre parole,in FM la f ha lo stesso ruolo di una qualsiasi oscillazione componente.



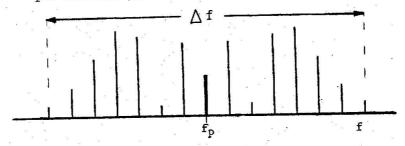
- Spettro di una modulazione FM con segnale sinusoidale Fig. 11 -
- I segnali modulati in frequenza presentano una migliore qualità in ricezione rispetto a quelli modulati in ampiezza.

 L'onda E.M. difatti,nel suo percorso di propagazione, è soggetta ad
 attenuazioni, a rumore radioelettrico e ad interferenze con altre
 emissioni, tutti fattori questi che incidono pressocchè esclusivamente sull'ampiezza dell'onda.

Nella AM il contenuto informativo è insito nell'ampiezza della oscillazione, per cui questo risulta deteriorato durante la propagazione; nella FM invece l'informazione è nella frequenza dell'onda e pertanto non risente apprezzabilmente delle alterazioni provocate da attenuazioni, interferenze etc. .

(5) La larghezza del canale FM viene definita come quella porzione di spettro, centrata su fp, contenente il 99% dell'energia dell'onda modulata in FM.

Difatti pur risultando infinito il numero delle oscillazioni componenti, queste da una certa distanza da fp in poi hanno una ampiezza trascurabile (Fig. 12).



- Larghezza di canale Af in FM -

- Fig .12 -

Nella pratica si può ritenere che le oscillazioni componenti abbiano una ampiezza significativa entro i limiti approssimativi di:

$$\mathbf{f}_{p}$$
 - $(\mathbf{f}_{m} + \delta)$; $\mathbf{f}_{p} + (\mathbf{f}_{m} + \delta)$

per cui la <u>larghezza del canale FM</u> risulta praticamente data da:

$$\Delta \mathbf{f} \cong 2(\mathbf{f}_{\mathbf{m}} + \delta) . \tag{5}$$

Ad esempio, con fm = 1 KHz e δ = 75 KHz si avrà Δ f $\stackrel{\sim}{=}$ 152 KHz.

- (6) L'ampiezza relativa dell'oscillazione a frequenza fp (portante) e delle oscillazioni laterali è legata al rapporto fra la deviazione di frequenza δ e la frequenza del segnale modulante fm; tale rapporto m_f = δ/fm prende il nome di indice di modulazione e gioca, per la modulazione di frequenza, un ruolo analogo a quello dell'indice di modulazione "m" nella modulazione di ampiezza. Lo studio della dipendenza delle ampiezze delle oscillazioni componenti dall'indice di modulazione è notevolmente complesso e non è rappresentabile in una semplice forma analitica.
 - sinusoide come avviene ad esempio con i segnali fonici lo spettro di modulazione diviene naturalmente più complicato. La larghezza del canale di frequenza non subisce, però, grandi modificazioni rispetto alla formula (5); essa risulta approssimativamente il doppio della somma della massima deviazione di frequenza ômax e della massima frequenza fmax contenuta nel segnale modulante:

$$\Delta f \approx 2 \left(\delta_{max} + f_{max} \right)$$
.

Nei sistemi di radiodiffusione a modulazione di frequenza la deviazione massima ha il valore normalizzato δ max = 75 KHz, mentre la massima frequenza acustica che viene trasmessa è fmax = 15 KHz. Ne risulta, perciò, una larghezza del canale di frequenza dell'ordine di 180 KHz; in pari condizioni, con la modulazione di ampiezza, la larghezza del canale di frequenza sarebbe stata di appena $\Delta f = 2$ fmax = 30 KHz.

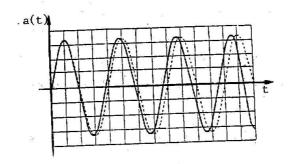
c. - Modulazione di fase

(1) Modulare in fase una oscillazione a Radiofrequenza significa far variare la fase istantanea della portante in maniera proporzionale all'ampiezza del segnale modulante.

Tale variazione avviene attorno ad un valore fisso ϕ_o e la sua entità è proporzionale all'ampiezza del segnale modulante.

Nella terminologia anglosassone la tecnica prende il nome di "Phase Modulation" e si indica con $\ensuremath{\Phi M}$.

(2) In figura 13 è rappresentata la forma d'onda risultante di una oscillazione modulata in fase da un segnale f_m (ad esempio sinusoidale dello stesso tipo rappresentato in Fig. 9b a pag. 16), limitatamente ad un intervallo di tempo in cui l'onda sta anticipando in fase.



- Forma d'onda di una oscillazione фM - Fig. 13 -

La curva tratteggiata rappresenta la portante non modulata a fase fissa, mentre quella continua rappresenta l'onda modulata che sta anticipando progressivamente in fase.

L'esame di Fig. 13 mostra chiaramente come la variazione di fase in anticipo equivale ad una diminuzione del periodo e quindi ad un aumento della frequenza.

Analogamente, negli intervalli di tempo in cui la fase ritarda progressivamente si ha un aumento del periodo e quindi una diminuzione della frequenza.

Si può pertanto affermare che la modulazione di fase è equivalente ad una modulazione di frequenza, per tale motivo nelle trasmissioni di tipo convenzionale si fa esclusivamente riferimento alle sole modulazioni di ampiezza e di frequenza.

(3) Da un punto di vista analitico riprendiamo in considerazione la:

$$a(t) = A sen (2\pi f_p + \phi_o)$$
.

Per modulare in fase questa onda occorre far variare la fase ϕ nel tempo con lo stesso andamento del segnale modulante.

Supponendo il segnale modulante sinusoidale, la fase istantanea $\phi(t)$ oscillerà attorno al valore ϕ_o dell'onda non modulata.

Anche dall'esame analitico si può facilmente rilevare come la modulazione di fase e quella di frequenza siano tra di loro molto simili.

Difatti sia "f "sia o fanno parte dell'argomento della funzione sinusoidale, pertanto la variazione dell'una o dell'altra caratteristica comporta una variazione nel tempo dell'angolo il cui seno descrive la oscillazione.

Per tale motivo sia la modulazione di frequenza sia quella di fase vengono dette modulazioni angolari.

(4) Anche per la modulazione di fase viene definita la $\frac{\text{deviazione di fase}}{\text{deviazione di fase}} \; \delta_{\varphi} \; ; \; \text{che rappresenta lo scarto massimo che subisce la fase in funzione dell'ampiezza del segnale modulante.}$

Data la similitudine con la modulazione di frequenza ed il ridottissimo impiego della ϕM , limitato ad alcune utilizzazioni molto particolari, non si ritiene opportuno soffermarci ulteriormente su questo tipo di modulazione.

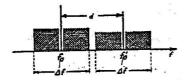
3. - CANALIZZAZIONE DELLE EMISSIONI

a. - Canali AM ed FM

(1) All'antenna ricevente, oltre all'onda desiderata, giungono le onde e.m. prodotte da altre stazioni trasmittenti.

La selezione dell'oscillazione desiderata dalle altre è possibile in quanto le varie stazioni trasmettono su frequenze diverse.

Per poter selezionare fra loro le varie stazioni non basta che le frequenze portanti siano diverse, bensì occorre che esse differiscano in modo tale che la banda laterale inferiore di una non si sovrapponga con la banda superiore di quella con frequenza più bassa. (Fig. 14).



- Canali adiacenti -- Fig. 14 -

Da ciò deriva che su una determinata gamma di frequenze può operare solo un numero delimitato di stazioni trasmittenti. zione modulata in ampiezza, essendo il doppio della massima frequenza f_{max}, contenuta nel segnale modulante, dipende dalla qualità del suono che ha dato origine a questo; in un'orchestra, ad esempio, la frequenza di qualche armonica delle note più alte può giungere e superare i 15 ÷ 20 KHz, per cui per la trasmissione dei relativi segnali, la larghezza dei canali dovrebbe essere superiore a 30 ÷ 40 KHz.

Per poter disporre di un adeguato numero di canali, una convenzione internazionale ha assegnato ad ogni stazione di radiodiffusione ad onde medie un canale di larghezza Δf = 9 KHz ed uno scarto di frequenza d'fra le portanti adiacenti pari a 10 KHz; nella gamma di 1080 KHz, compresa fra 525 e 1605 KHz, trovano posto perciò 108 canali distinti corrispondenti ad altrettante stazioni.

Per ottenere un canale di 9 KHz vengono soppresse dal segnale modulante, mediante opportuni filtri, le componenti di frequenza superiore a 4,5 KHz, ciò rende evidentemente imperfetta la riproduzione dei suoni in ricezione; tuttavia l'orecchio umano generalmente non avverte in modo particolare tale imperfezione.

La modulazione di frequenza, impossibile ad usarsi in onde medie, viene normalmente impiegata con oscillazioni a frequenza assai più alta: ad esempio, la radiodiffusione a modulazione di frequenza, in Italia, utilizza la gamma di frequenze compresa fra 88 e 108 MHz. La deviazione massima di frequenza è $\delta_{\rm max}$ = 75 KHz.

sola intellegibilità della parola, inoltre gli operatori sono addestrati a ricevere ed interpretare messaggi anche in condizioni di non perfetta udibilità, pertanto allo scopo di aumentare il numero di canali, le frequenze dei segnali modulanti vengono limitate a 3 KHz, la larghezza del canale pertanto può ridursi a 6 KHz in AM o addirittura a 3 KHz (Banda HF) nella modalità Single Side Band (SSB) in seguito descritta.

Nei casi in cui viene utilizzata la FM (Banda VHF e UHF), la deviazione viene limitata tipicamente a \pm 5 KHz (VHF) oppure a \pm 7,5 KHz (UHF).

b. - Considerazioni energetiche sulla modulazione di ampiezza

(1) E' utile rendersi conto dell'entità della potenza che un amplificatore a radiofrequenza immette nella resistenza di utilizzazione R (antenna trasmittente) in condizioni di modulazione di ampiezza.

Nell'ipotesi di modulazione sinusoidale con frequenza di modulazione f_m e profondità di modulazione m, l'espressione della corrente "i" che circola nella antenna trasmittente (che viene vista dal trasmettitore come una resistenza di utilizzazione R) è del tipo :

 $i = [I (1 + m sen 2\pi f_m t)] sen 2\pi f_p t$;

come abbiamo visto in precedenza essa può riscriversi:

 $i = I \text{ Sen } 2\pi f_p t + \frac{mI}{2} \text{ Sen } \{2\pi (f_p - f_m)t + \frac{\pi}{2}\} + \frac{mI}{2} \text{ Sen } \{2\pi (f_p + f_m)t - \frac{\pi}{2}\}.$

e può quindi considerarsi come la somma di tre componenti sinuscidali, aventi rispettivamente ampiezza I e frequenza $f_p \qquad \text{(oscillazione portante), ampiezza} \ \frac{\text{m I}}{2} \ \text{e frequenza}(f_p\text{-fm})$ (oscillazione laterale inferiore), ampiezza $\frac{\text{m I}}{2}$ e frequenza($f_p\text{+fm}$) (oscillazione laterale superiore).

La potenza immessa in R è la somma delle potenze che competono alle tre componenti della corrente aventi rispettivamente i valori efficaci $\frac{\mathbb{I}}{\sqrt{2}}, \frac{m.\mathbb{I}}{2\sqrt{2}}$, e $\frac{m.\mathbb{I}}{2\sqrt{2}}$. La potenza relativa alla portante è perciò data da:

$$P_{p} = \frac{1}{2} I^{2} R$$

La potenza relativa a ciascuna oscillazione laterale è $m^2 \, I^2 R/8 = m^2 P_p/4 \qquad \text{per cui la potenza complessiva delle due}$ oscillazioni laterali è:

$$P_{\text{tot}} = \frac{m^2 I^2 R}{4} = \frac{m^2}{2} P_{\text{p}}$$

La totale potenza immessa in R risulta pertanto:

$$P_{tot} = P_p + P_{lat} = P_p (1 + \frac{m^2}{2}).$$
 (6)

Poichè il massimo valore di m è 1 (modulazione al 100%), la massima potenza connessa alle oscillazioni laterali risulta la metà di quella dell'oscillazione portante, che coincide con quella dell'oscillazione non modulata.

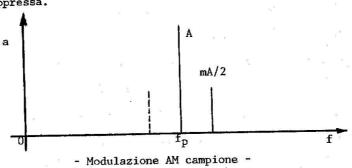
Dalla formula (6) risulta che per m = 1 si ha $P_{tot} = 3P_{p}/2$, dal che si deduce che, della potenza P_{tot} associata ad un'oscillazione modulata al 100%, due terzi si riferiscono alla portante, mentre soltanto un terzo si riferisce alle oscillazioni laterali. D'altra parte l'oscillazione portante non contiene in sè alcun carattere del segnale modulante, per cui la potenza P ad essa connessa è da considerarsi, in un certo senso, sprecata agli effetti della trasmissione dell'informazione; sotto questo aspetto, la potenza utile è soltanto quella associata alle oscillazioni laterali: $P_{lat} = m^2 P_p/2$ dato che esse sole portano in sè il carattere del segnale modulante.

Queste considerazioni mostrano la convenienza di usare gradi di modulazione quanto più prossimi ad 1 è possibile, affinchè la potenza utile non risulti un'aliquota troppo piccola della potenza totale trasmessa.

c. - Modulazione AM compatibile

L'informazione da trasmettere con la modulazione AM, è contenuta in egual modo nelle due bande laterali, pertanto in alcune applicazioni ove è necessario poter disporre di canali con stretta larghezza di banda una delle due può essere soppressa realizzando così la modulazione detta "AM compatibile" o anche AME (Amplitude Modulation Equivalent) (Fig. 15).

In taluni casi anche la portante può essere parzialmente soppressa.



- Fig. 15 -

I vantaggi che tale tecnica comporta sono i seguenti:

- dimezzamento della larghezza del canale utilizzato;
- riduzione della potenza di emissione;
- possibilità di ricezione con ricevitori AM di tipo convenzionale (da cui il termine compatibile).

Questa modalità è obbligatoria in ricezione nella banda HF per poter ricevere eventuali segnali di soccorso che potrebbero essere trasmessi in SSB o in AM.

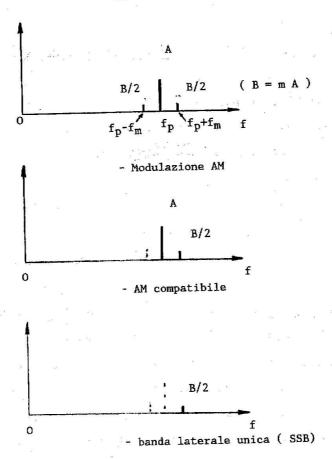
d. - Modulazione in banda laterale unica - Single Side Band (SSB)

(1) Poichè nella modulazione di ampiezza la portante non contiene in sè il carattere del segnale informativo, la potenza ad essa connessa è perduta, come abbiamo già detto, agli effetti della trasmissione dell'informazione. In considerazione di ciò, in particolari sistemi di comunicazioni, la portante viene soppressa e vengono trasmesse le sole oscillazioni laterali, il che è possibile poichè anch'esse hanno frequenze radio; in siffatti sistemi l'intera potenza trasmessa è attribuita alle oscillazioni laterali e risulta nulla in assenza del segnale modulante. E' anche possibile, senza perdere nulla del contenuto informativo, trasmettere solamente le oscillazioni di una banda laterale (inferiore o superiore), eliminando quelle dell'altra banda. Avremo in tale modo realizzato una trasmissione in banda laterale unica (Single Side Band).

In figura 16 sono rappresentati gli spettri di frequenza di una modulazione AM, una AM compatibile ed una SSB, tutti relativi ad una modulazione con segnale sinusoidale.

Per quanto concerne la rappresentazione degli spettri della AM compatibile e della SSB di figura 16 in questa è stata ipotizzata la sola eliminazione della banda indesiderata e della portante.

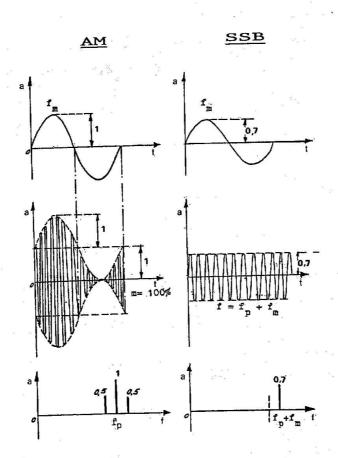
Nelle pratiche realizzazioni dopo il filtraggio, il restante segnale viene notevolmente amplificato in potenza.



- Spettri AM,AM compatibile e SSB - Fig. 16 -
- (2) Nel confronto tra la modulazione di ampiezza e la SSB, a a parità di rapporto segnale/rumore al ricevitore, la tecnica SSB presenta i seguenti notevoli vantaggi: - sensibile riduzione della potenza totale emessa, oppure a parità di potenza emessa, massima concentrazione sul solo segnale utile;
 - dimezzamento della larghezza di banda del canale;
 - possibilità di utilizzazione di un numero doppio di canali.

(3) In fig. 17 si riporta, a titolo di esempio, un confronto tra una modulazione AM ed una modulazione SSB.

Come si può vedere in SSB, con un tono modulante f_m il segnale risultante che viene trasmesso è costituito da una sola oscillazione sinusoidale di frequenza $f=f_p+f_m$.



-Confronto AM, SSB -

- Fig. 17 -

Dall'esame di Fig. 17 emerge inoltre una importante caratteristica della modalità SSB, quella della riduzione della potenza totale emessa a parità di rapporto segna-le/rumore in ricezione.

Difatti avendo indicato con "a" l'ampiezza di una grandezza elettrica quale la tensione o la corrente, la potenza dipende dal quadrato di questa $(P = V^2/R = I^2 R)$.

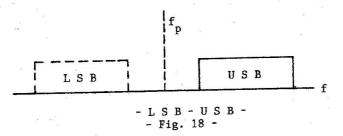
In modalità AM, con profondità di modulazione m=100%, l'ampiezza della oscillazione modulata raggiunge un picco pari a due volte quello del segnale modulante; pertanto la Potenza di Picco (PEP = Peack Envelope Power) assume un valore numerico pari a quattro volte quello dell'ampiezza f_m .

In modalità SSB, invece, la potenza è legata solo all'ampiezza del segnale modulante $\mathbf{f}_{\mathbf{m}}.$

(4) Nel caso di modulazione con un segnale vocale (tutte le frequenze comprese tra 300 e 3400 Hz) in modalità SSB verrebbe emesso lo spettro raffigurato in Fig. 48.

A seconda che venga emessa la sola banda superiore o la sola banda inferiore si avrà:

- USB (Upper Side Band).
- LSB (Lower Side Band).



In alcune applicazioni, le due bande USB ed LSB possono essere impiegate simultaneamente trasmettendo su ciascuna di esse una differente comunicazione (ad es. una in voce ed una in telegrafia).

Tale modalità prende il nome di $\underline{\text{ISB}}$ ($\underline{\text{Indipendent Side}}$ $\underline{\text{Band}}$).

(5) L'SSB è l'unica modalità consentita per le comunicazioni nella banda HF dalle "Radio Regulations", edite dalla "International Telecommunication Union".

Tale restrizione si è resa necessaria a causa dell'elevatissimo numero di richieste di canali militari e
civili in questa banda, derivanti sia dalle sue peculiari
caratteristiche di propagazione che consentono collegamenti a media distanza (per onda superficiale) ed a lunga
distanza (per onda ionosferica), sia in quanto le tecnologie HF sono ormai acquisite da svariati anni il che
consente realizzazioni di apparati con costi contenuti.

4. - IL TRASMETTITORE

a. - Generalità

Per trasmettere via radio una informazione è necessario trasformare questa in forma di segnale elettrico allo scopo di modulare opportunamente un'oscillazione a radiofrequenza detta portante.

La radiofrequenza, così modulata, prima di essere immessa nell'antenna trasmittente deve essere adeguatamente amplificata.

Le sopradette operazioni di modulazione ed amplificazione vengono svolte dal trasmettitore.

Le informazioni da trasmettere possono essere tipicamente dei seguenti tipi:

- segnali fonici;
- segnali telegrafici;
- segnali digitali;
- segnali televisivi.

I segnali fonici vengono trasformati in elettrici per mezzo di un particolare trasduttore denominato microfono.

I segnali telegrafici e digitali in numerose applicazioni vengono trasformati in toni audio per poter effettuare la

modulazione tramite gli stessi circuiti utilizzati per la fonia; oppure modulano direttamente la portante per mezzo di particolari dispositivi.

Nelle applicazioni televisive la variazione dell'intensità luminosa del segnale video viene trasmessa in forma di modulazione di ampiezza della portante.

Nel presente capitolo, allo scopo di semplificare la trattazione, ipotizzeremo la sola trasmissione di segnali fonici.

b. - Principio di funzionamento del trasmettitore

Con riferimento allo schema a blocchi di Fig. 19., il segnale fonico captato dal microfono viene da questo trasformato in una tensione variabile a frequenza fm.

L'intensità di tale segnale generalmente non è sufficientemente ampia per effettuare la modulazione, pertanto viene
amplificata per mezzo di un apposito amplificatore denominato
"Audio Frequenza" o più comunemente, "bassa frequenza" (BF),
per contraddistinguerlo dall'amplificatore a radiofrequenza che
opera a frequenze notevolmente più elevate.

Un oscillatore intanto genera la radiofrequenza fp che dovrà essere modulata (portante).

Anche tale frequenza, generata tipicamente da un oscillatore al quarzo, richiede una opportuna amplificazione.

ANTENNA

MICROFONO

fm AMPLIFICATORE BF

fp MODULATORE

fp

AMPLIFICATORE RF

STADIO

STADIO FINALE

fp

OSCILLATORE fp

OSCILLATORE fp

- Schema di principio del trasmettitore -

- Fig. 19 -

Le due oscillazioni (modulante e portante) così ottenute vengono combinate nel dispositivo denominato modulatore, all'uscita del quale si otterrà la fp modulata da fm (in ampiezza o in frequenza o in fase).

L'uscita del modulatore per poter essere irradiata con la potenza necessaria a raggiungere le portate desiderate, viene amplificata per mezzo di un amplificatore a radio frequenza (RF), più raramente denominato ad "Alta Frequenza".

Nei trasmettitori ad elevata potenza l'amplificazione desiderata non può essere tecnicamente raggiunta in un unico passo, per cui si rende necessario ricorrere a più stadi amplificatori in cascata.

L'ultimo amplificatore, che prende il nome di stadio finale, costituisce in genere l'elemento più critico del trasmettitore sia in quanto dovendo produrre elevate potenze è soggetto ad elevate tensioni e correnti e quindi ad elevate temperature, sia in quanto deve sopportare la potenza riflessa proveniente dall'antenna nel caso di disadattamento o danneggiamento di questa.

In casi estremi difatti la linea d'antenna a causa di infiltrazioni d'acqua può divenire un corto circuito, oppure a causa di interruzioni può risultare una linea aperta, in tali eventualità tutta la potenza emessa rientra nel trasmettitore con possibilità di seri danneggiamenti, a meno che non siano stati previsti opportuni dispositivi di protezione.

c. - Selezione dei canali

(1) Il trasmettitore fin qui ipotizzato può operare sulla sola frequenza fp, generata dall'oscillatore al quarzo.

Nelle tipiche realizzazioni per telecomunicazioni si richiede invece che gli apparati operino su una frequenza selezionabile su di una certa gamma.

Per consentire tale selezione il trasmettitore può contenere un certo numero di oscillatori quarzati (ad es. 6), ciascuno dei quali operante su di una differente frequenza.

Questa soluzione trova al momento applicazioni solo in alcuni tipi di apparati portatili e radiomarittimi (canali di porto in banda VHF).

I trasmettitori che utilizzano più quarzi per effettuare la selezione di frequenza vengono detti "canalizzati", in essi quindi la scelta di una frequenza è vincolata alla presenza del quarzo desiderato.

(2) Per le applicazioni in cui è necessario poter selezionare un elevato numero di frequenze non risulta opportuno, per motivi di costi e di ingombri, dotare il trasmettitore di tanti quarzi quante sono le frequenze.

In tal caso si può ricorrere ad esempio a dei moltiplicatori, facendo seguire un oscillatore, o più oscillatori, da opportuni moltiplicatori di frequenza.

Con tale dispositivo, con un quarzo operante a frequenza fo, è possibile ottenere "nfo" frequenze (con'n' intero).

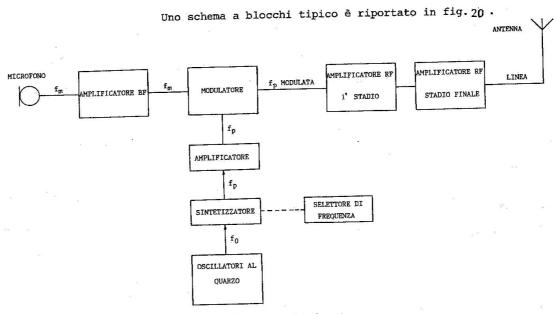
Questa soluzione non trova al momento applicazioni degne di interesse.

(3) Nella stragrande maggioranza delle attuali applicazioni è possibile far variare la frequenza entro una certa banda, a piccoli passi ad es. di 100 Hz in 100 Hz in HF e di 25 KHz in 25 KHz in UHF, utilizzando un solo oscillatore quarzato. Questa capacità viene ottenuta per mezzo di uno speciale circuito elettronico: il <u>sintetizzatore di frequenza</u>.

Il sintetizzatore è un dispositivo che effettua sulla frequenza di ingresso varie operazioni di moltiplicazione, divisione, somma e differenza, mantenendo per tutte le selezionabili frequenze di uscita la stessa stabilità dell'oscillatore di partenza.

A titolo di esempio con gli apparati operanti in banda HF in servizio nella Marina Militare è possibile selezionare 280.000 differenti canali partendo da un solo oscillatore a quarzo molto stabile.

I trasmettitori che fanno uso di tale dispositivo vengono denominati "sintetizzati".



- Trasmettitore sintetizzato -

d. - Caratteristiche principali

Il trasmettitore radio deve operare in una ben determinata banda di frequenza in relazione al suo previsto impiego, erogando una potenza di livello adeguato per la corretta ricezione dei segnali da parte delle stazioni desiderate.

Inoltre ciascuna emissione deve essere stabile in frequenza e radioelettricamente "pulita" per non interferire con altre trasmissioni.

Pertanto: la banda di frequenza, la potenza, la stabilità e l'emissione di armoniche e spurie costituiscono i requisiti fondamentali di un trasmettitore. Su di essi ci soffermeremo brevemente ai punti seguenti.

(1) Banda di frequenza

La gamma di frequenza entro la quale un sistema di telecomunicazioni deve operare viene definito in funzione del tipo di servizio che si intende svolgere e delle portate che si devono ottenere.

A titolo di esempio per quanto concerne le applicazioni a bordo delle unità della Marina Militare, vengono impiegate le seguenti bande:

- HF (1.5 30 MHz) : per le comunicazioni a lunga distanza;
- UHF (225 400 MHz); per le comunicazioni a corto raggio (Line of Sight);
 - VHF (156 160 MHz): per le comunicazioni radiomarittime e di porto (con rimorchiatori, piloti etc.) .

Gli apparati operanti nelle differenti bande di frequenza differiscono per le tecnologie dei componenti impiegati e per i tipi di modulazione consentiti;

- SSB in HF,
- AM in UHF,
- FM in VHF,
- e per le dimensioni delle antenne trasmittenti che saranno tanto maggiori quanto maggiore è la lunghezza d'onda (tipicamente le altezze sono dell'ordine di λ /2 o λ /4).

(2) Potenza

La potenza di un apparato viene stabilita in funzione delle portate che si intendono raggiungere.

Livelli insufficienti di potenza trasmessa possono costituire la causa di mancati collegamenti, mentre valori troppo elevati possono dar luogo ad interferenze con altri apparati operanti su canali adiacenti a quello utilizzato.

La massima potenza di un trasmettitore incide in maniera determinante sul costo dell'apparato, sulle sue dimensioni, sul calore dissipato nel locale (e quindi sulla definizione dei sistemi di refrigerazione e ventilazione) e sull'assorbimento di potenza dalla rete di alimentazione elettrica.

Generalmente sugli apparati più diffusi il livello di potenza è impostabile o regolabile da parte dell'operatore.

Gli apparti di bordo in dotazione alla Marina Militare possono operare con le seguenti potenze: banda HF: 250 - 500 - 1000 W; banda UHF: 3 - 15 - 30 W; banda VHF: 1 - 25 W.

(3) Stabilità di frequenza

Ai fini del corretto impiego di un trasmettitore è

necessario che questo emetta con precisione sulla frequenza selezionata e che tale valore rimanga estremamente stabile nel tempo.

Se così non fosse, difatti, il ricevitore intenzionato a ricevere una determinata comunicazione dovrebbe in continuazione correggere la frequenza di ascolto "inseguendo" la portante in arrivo.

Inoltre una emissione non sufficientemente stabile potrebbe interferire con altre emissioni sconfinando in canali adiacenti.

Pertanto la necessità di elevate stabilità di frequenza impone l'uso di adeguati oscillatori piloti al quarzo.

Dato che i quarzi "derivano" (cioè si scostano dal valore di frequenza nominale) per effetto della temperatura, questi vengono opportunamente raffreddati oppure posti in contenitori in cui la temperatura viene mantenuta costante.

Il valore di frequenza dei quarzi varia anche a causa dell'invecchiamento pertanto dopo lunghi periodi di tempo è opportuno procedere alla loro sostituzione.

Nei sistemi di telecomunicazione più avanzati è prevista la generazione di frequenze altamente stabili per mezzo di oscillatori atomici (campioni primari al cesio oppure oscillatori al rubidio) e la distribuzione di

queste ai vari apparati, che dovranno essere pertanto dotati di opportune prese per il prelievo della oscillazione di riferimento, che costituirà l'ingresso del sintetizzatore.

(4) Armoniche e Spurie

Oltre alla frequenza voluta f il trasmettitore emette i seguenti segnali indesiderati:

- le armoniche (con valori di frequenza multipli interi di f_p);
- le spurie, generalmente addensate intorno alla portante.

La qualità di un trasmettitore è strettamente legata alla "pulizia" dell'emissione e pertanto al valore di attenuazione che i livelli delle armoniche e spurie presentano rispetto a quello della portante.

Negli apparati per comunicazioni militari le armoniche e le spurie presentano i seguenti valori tipici di attenuazione:

- Banda HF : 50 ÷ 60 dB;

- Banda UHF: 70 ÷ 80 dB.

Ovviamente anche tali emissioni contribuiscono all'insorgere di interferenze tra differenti apparati posti nelle reciproche vicinanze (problematica molto sentita a bordo delle Unità Navali).

In particolare le armoniche possono far sì che un trasmettitore interferisca con sistemi operanti in bande di frequenza anche notevolmente distanti.

Queste emissioni indesiderate vengono ridotte filtrando adeguatamente i segnali da trasmettere.

5. - IL RICEVITORE

a. - Generalità

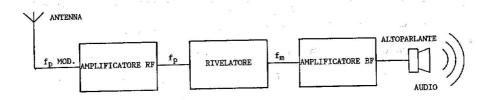
Il ricevitore ha il compito di rendere disponibile (ad es. udibile) il segnale modulante che costituisce l'informazione trasmessa.

Pertanto dopo che l'antenna ricevente ha captato la frequenza portante f_p modulata da f_m , il ricevitore, con opportune operazioni di amplificazione e demodulazione, separa la portante dalla modulante e riconverte quest'ultima nella sua forma di segnale originale, ad esempio fonico, telegrafico, video etc.

b. - Principio di funzionamento del ricevitore

In linea di principio un ricevitore comprende, come è mostrato nella figura 21, le seguenti parti: l'antenna ricevente; un amplificatore che eleva la debole oscillazione indotta nell'antenna; un rivelatore che estrae dall'oscillazione modulata il segnale di bassa frequenza f_m ; un amplificatore di b.f. che eleva la tensione del segnale prodotto dal rivelatore e conferisce al segnale la potenza necessaria; l'altoparlante (nel caso ipotizzato di segnali fonici)che trasduce i segnali elettrici di frequenza f_m in segnali audio di pari frequenza.

Un ricevitore deve poter essere in grado di funzionare con oscillazioni a radiofrequenza, fornitegli dall'antenna, aventi ampiezze dell'ordine dei microvolt; d'altra parte al rivelatore, per il suo corretto funzionamento, deve essere applicata una tensione a radiofrequenza dell'ordine di qualche volt; per ottenere tale amplificazione sono possibili due diversi metodi che conducono a due diversi tipi di ricevitori: il metodo dell'amplificazione diretta ed il metodo della conversione di frequenza.



- Schema di principio del ricevitore -

- Fig. 21 -

Nei ricevitori ad amplificazione diretta l'amplificatore è costituito da un certo numero di stadi di amplificazione a radiofrequenza (RF) tutti accordati sulla frequenza da ricevere. Tale metodo è ora praticamente abbandonato soprattutto per le difficoltà di ottenere un'amplificazione uniforme ed una selettività costante per tutta la vasta gamma delle frequenze da ricevere. Questi inconvenienti vengono eliminati con i ricevitori a conversione di frequenza, detti più comunemente ricevitori supereterodina, che costituiscono la grande maggioranza degli apparati oggi in uso. In questi, anzichè compiere

l'amplificazione direttamente sulle oscillazioni che giungono dall'antenna (le cui frequenze occupano una gamma vastissima), si opera una conversione della loro frequenza in una frequenza più bassa e di valore fisso, su cui è più agevole compiere l'amplificazione.

c. - Il ricevitore supereterodina

(1) Nei ricevitori supereterodina la conversione di frequenza si effettua in modo che qualunque sia la frequenza portante fp che si vuol ricevere, questa viene sempre convertita in una frequenza fissa detta frequenza intermedia o media frequenza o intermediate frequency (IF).

La IF nei ricevitori della radio diffusione civile è dell'ordine di 450 ÷ 500 KHz. Nei ricevitori in uso nella Marina Militare è di 500 KHz in HF e di 50 MHz o 70 MHz in UHF.

Per effettuare la conversione (Fig. 22.) occorre generare con un oscillatore locale una frequenza f_0 la quale differisca da f_p di valore uguale alla IF prefissata.

L'oscillatore locale potrebbe avere indifferentemente le frequenze $f_0 = f_p + IF$ oppure $f_0' = f_p - IF$; si preferisce di solito usare una frequenza locale maggiore di quella dell'onda in arrivo e quindi la frequenza $f_0 = f_p + IF$.

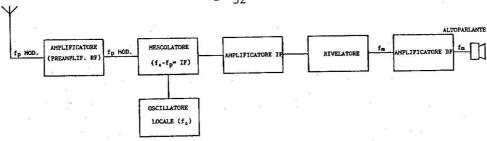
L'oscillatore locale quindi deve essere regolato volta per volta in relazione alla frequenza f_p della trasmissione a frequenza che si vuol ricevere. Ad esempio, se si vuol ricevere un segnale f_p = 1 MHz e la frequenza intermedia è IF = 470 KHz, l'oscillatore locale deve essere regolato in modo da produrre la frequenza f_0 = 1470 KHz.

Dato che i livelli tipici dei segnali captati dall'antenna sono dell'ordine dei μv , per poter eseguire correttamente l'operazione di miscelazione è necessario amplificare preventivamente la radiofrequenza ricevuta per mezzo di un amplificatore RF detto anche preamplificatore.

L'oscillazione IF fornita dal convertitore viene applicata ad un amplificatore, detto a frequenza intermedia. La IF così amplificata è applicata al rivelatore che ne estrae la modulante $\mathbf{f}_{\mathbf{m}}$.

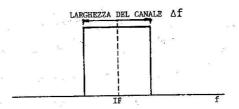
Il segnale f_m viene quindi amplificato in un amplificatore di bassa frequenza e trasformato in segnale acustico dall'altoparlante. La selezione delle varie oscillazioni a frequenza portante diversa, provenienti dall'antenna, avviene nel modo di seguito descritto.

Consideriamo l'esempio precedente, in cui l'oscillatore locale è regolato sulla frequenza $f_0 = 1470 \text{ KHz}$ onde poter ricevere una trasmissione a frequenza $f_p = 1000 \text{ KHz}$. Supponiamo che al convertitore giunga dall'antenna insieme alla f_p voluta, anche la frequenza $f_p' = 1010 \text{ KHz}$.



- Fig. 22 - Ricevitore supereterodina. -

A seguito della conversione si avranno così le due frequenze $f_0 - f_p = IF = 470$ KHz e $f_0 - f_p' = 460$ KHz; questa seconda oscillazione viene però scartata dall'amplificatore IF accordato sulla frequenza 470 KHz e dai relativi filtri. I circuiti IF quindi provvedono a dare la necessaria selettività al ricevitore. Poichè le oscillazioni modulate sono costituite dalla portante e dalle due bande laterali, occupanti complessivamente un canale di frequenza di larghezza Λf , l'amplificatore IF deve possedere una larghezza di banda tale da far passare tutte le componenti desiderate del segnale modulante f_m (Fig.23)



- Banda passante IF -

- Fig. 23 -

(3) Insito nell'applicazione della conversione di frequenza c'è il problema della frequenza immagine. Supponiamo che il ricevitore sia predisposto per ricevere una determinata frequenza f (ad es. 1000 KHz); l'oscillatore locale dovrà allora produrre una frequenza:

$$f_o = f_p + IF$$
 (ad es. 1470 KHz)

tale da ottenere

$$\left| \mathbf{f_o} - \mathbf{f_p} \right| = \mathbf{IF} = 470 \text{ KHz}$$

Si può però facilmente osservare che anche la frequenza:

$$f_p^* = f_p + 2IF = f_o + IF$$
 (1940 KHz nel nostro esemplo) differisce da f_o del valore IF.

Infatti, miscelando fo con f si ha:

$$\left| f_{0} - f_{p}^{*} \right| = \left| f_{0} - f_{0} - IF \right| = \left| -IF \right| = IF$$

Pertanto se all'ingresso del ricevitore, oltre alla voluta f fosse presente anche la f , entrambe verrebbero convertite a frequenza IF interferendo così tra di loro.

La frequenza f definita dalle relazioni (7)

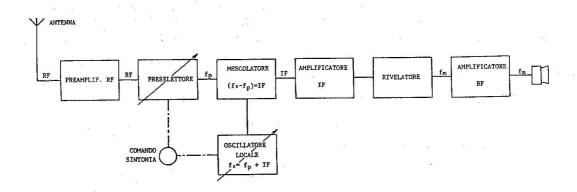
prende il nome di frequenza immagine di fp; come si può
notare essa differisce da f del doppio di IF.

La frequenza immagine trova spiegazione nel fatto che nel miscelatore le operazioni di differenza vengono effettuate tenendo conto del valore assoluto del risultato. Come noto infatti non ha senso considerare le frequenze di segno negativo.

Per impedire che la frequenza immagine giunga al mescolatore è necessario inserire prima di questo un filtro, detto preselettore (Fig. 24).

Questo filtro può essere di tipo selettivo (accordabile su f) oppure un semplice passa-basso anch'esso variabile, che faccia passare la sola fp eliminando la f dato che quest'ultima è la più elevata delle due.

Pertanto nell'eseguire l'operazione di sintonia (Tuning) su di un ricevitore si fanno variare, per mezzo della stessa manopola, sia l'oscillatore locale sia il preselettore.



- Schema completo del ricevitore supereterodina -

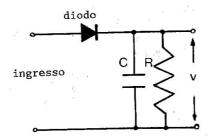
d. - Il rivelatore AM

L'operazione complementare della modulazione mediante la quale il ricevitore estrae dall'oscillazione ricevuta il solo segnale modulante, separandolo dalla portante, prende il nome di "demodulazione".

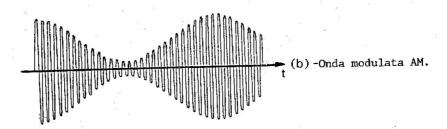
Il dispositivo che effettua la demodulazione, detto genericamente "demodulatore", prende il nome di <u>rivelatore</u> nel caso di modulazione AM.

Il principio di funzionamento del rivelatore AM è assimilabile a quello di un raddrizzatore di tensione e gli elementi circuitali che lo costituiscono sono essenzialmente un diodo ed un gruppo RC (Fig.25a).

L'oscillazione che giunge all'ingresso del rivelatore è del tipo indicato in(fig.25b).



(a)-Schema di principio del rivelatore.



Come ben noto il diodo lascia passare solo la semionda positiva per cui all'ingresso del gruppo RC si avrà la forma d'onda riportata in fig. 26.



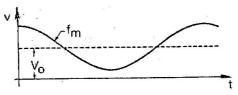
- Forma d'onda all'uscita del diodo -Fig. 26

Con la prima semionda positiva il condensatore si carica ed inizia a scaricarsi lentamente attraverso la resistenza R;al giungere della seconda semionda il condensatore viene però riportato al potenziale massimo dell'onda e così via.

Se la costante di tempo RC è opportunamente dimensionata la tensione "v" rivelata, che a parte le distorsioni subite durante la propagazione ripete l'andamento del segnale di informazione, segue l'andamento dell'inviluppo dell'onda (come indicato in fig. 26).

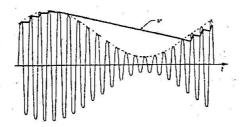
Contrariamente a quanto può sembrare dalla Fig. 26 la seghettatura della tensione risultante è in realtà trascurabile, dato che la "fp" è molto maggiore di "fm".

La tensione rivelata avrà pertanto l'andamento riportato in fig. 27,e può essere considerata come la somma di una componente continua V_o,facilmente eliminabile e della riproduzione del segnale modulante.



- Tensione rivelata -Fig. 27

Il corretto dimensionamento della costante di tempo RC è estremamente importante; difatti se RC è troppo grande il condensatore non si scarica con sufficiente rapidità e la sua tensione non riesce a seguire l'inviluppo della oscillazione modulata nella fase discendente (Fig. 28). Se d'altra parte la costante di tempo fosse troppo piccola, il consensatore si scaricherebbe troppo rapidamente accentuando così notevolemtne l'entità della seghettatura. Pertanto essa deve essere opportunamente commensurata al rapporto fra la frequenza del segnale e la frequenza intermedia IF.



- Distorsione derivante da un eccessivo valore di RC - Fig. 28 -

e. - Il discriminatore FM

Il dispositivo impiegato per la demodulazione dei segnali FM prende il nome di <u>discriminatore</u>.

Il principio di funzionamento, sul quale per semplicità di trattazione non ci soffermeremo, si basa sulla trasformazione delle variazioni in fase (e quindi di frequenza) del segnale in arrivo, in variazioni di ampiezza di una tensione, la quale viene immessa nell'amplificatore RF.

In pratica il discriminatore fà corrispondere ad ogni valore istantaneo della fase del segnale modulato FM un particolare livello di tensione, ricostruendo così le variazioni di ampiezza del segnale microfonico modulante utilizzato in trasmissione.

f. - Caratteristiche principali

Il ricevitore deve essere sensibile e cioè deve poter ricevere segnali anche di intensità molto piccola emessi da stazioni notevolmente distanti.

Inoltre deve essere selettivo, in grado cioè di selezionare differenti stazioni.

Infine deve essere fedele, ossia deve riprodurre il segnale originale senza introdurre apprezzabili distorsioni.

Pertanto la sensibilità, la selettività e la fedeltà costituiscono i requisiti fondamentali di un ricevitore. Su di essi ci soffermeremo brevemente ai punti seguenti.

(1) Sensibilità

Una delle doti fondamentali di un ricevitore è la sua sensibilità ossia la sua capacità di permettere la ricezione di segnali in arrivo di intensità molto piccola.

Generalmente i ricevitori vengono costruiti con sensibilità abbastanza elevate così da poter ricevere stazioni lontane e deboli. Poichè tale sensibilità risulta inutile per la ricezione delle stazioni vicine e potenti, in tutti i ricevitori vi è un apposito circuito per la regolazione automatica della sensibilità, ossia dell'amplificazione (guadagno) dello stadio IF che precede il rivelatore. Tale dispositivo prende il nome di "Controllo Automatico di Guadagno" (C.A.G.).

Il CAG consente di ottenere, per le stazioni trasmittenti lontane, un'intensità della riproduzione acustica
costante nonostante che l'intensità dell'onda in arrivo
vari continuamente per effetto di irregolarità nella sua
propagazione. In assenza della regolazione automatica la
ricezione subirebbe continue fluttuazioni ed affievolimenti.

La capacità di un ricevitore di percepire segnali di piccola intensità ha un senso se rapportata al <u>rumore radioelettrico</u> di fondo, rilevabile come un "fruscio" in uscita dall'altoparlante.

Tale rumore radioelettrico può essere generato sia all'esterno del ricevitore (rumore industriale, rumore atmosferico, rumore galattico) sia all'interno del ricevitore stesso per effetto termico (agitazione degli elettroni nei conduttori e nei componenti).

Tutti i sopramenzionati tipi di rumore, fatta eccezione per quello termico, decrescono all'aumentare della frequenza, per cui i loro effetti oltre i 300 MHz possono ritenersi trascurabili.

Da tale valore di frequenza in poi pertanto, la rumorosità del ricevitore è attribuibile esclusivamente alla qualità dei componenti usati, al loro raffreddamento ed agli accorgimenti tecnologici utilizzati.

particolare cura deve essere messa nella progettazione e realizzazione dei primi stadi di amplificazione; infatti i segnali che nascono nel primo stadio subiscono l'amplificazione di tutti gli altri stadi, mentre quelli che nascono negli stadi successivi vengono via via meno amplificati.

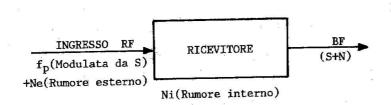
per i ricevitori a frequenze molto basse invece (VLF, LF) la rumorosità dovuta ai fattori esterni è decisamente preponderante rispetto a quella generata internamente, per cui praticamente solo a questi si devono i limiti della sensibilità.

L'esistenza del rumore di fondo, qualunque ne sia la causa pone un vincolo alla sensibilità di un ricevitore. Infatti, al diminuire dell'ampiezza del segnale che si desidera ricevere il suono in uscita dal ricevitore si trova sempre più mascherato dal rumore e l'operatore fa sempre maggiore fatica a distinguere l'uno dall'altro.

Esiste un certo valore del rapporo S/N fra il segnale utile (S) e quello disturbante (N) al disotto del quale non si può scendere, per un dato ricevitore, senza rendere impossibile la ricezione del segnale voluto. Nella rice-

zione radiofonica, in cui lo scopo è essenzialmente il diletto, il rapporto segnale/rumore deve essere elevato. Nel caso invece di ricezione di comunicazioni militari, in considerazione delle capacità degli operatori professionali, viene preso come riferimento un rapporto segnale/rumore più basso, dell'ordine di 10 dB. Nella ricezione radiotelegrafica, invece, è accettabile un rapporto segnale disturbo ancora più basso, dell'ordine di 5 dB.

Generalmente quindi la sensibilità di un ricevitore viene espressa come: il <u>livello del minimo segnale RF</u> modulato che deve essere presente in ingresso al ricevitore per ottenere in uscita, a bassa frequenza, un determinato rapporto S/N (Fig. 29).



N=Contributo totale di rumore in RF originato dai rumori a radiofrequenza Ne ed Ni

- Rilievo della sensibilità - Fig. 29 -

Ad esempio negli apparati UHF in dotazione alla Marina Militare il valore di sensibilità viene espresso dal seguente valore:

Ingresso RF di 1,5 μV

Per $\frac{S}{N}$ = 10 dB in AM;

Per $\frac{S}{N}$ = 16 dB In FM.

(2) Selettività

La selettività è la proprietà per la quale un ricevitore può discriminare, fra tutte le frequenze presenti in antenna, quella relativa alla portante desiderata.

Questa caratteristica dipende dalla larghezza di banda ΔF dei circuti IF (Fig 30).

Ovviamente tanto più stretto sarà il canale Δf tanto maggiore sarà il numero di canali che l'apparato può selezionare su di una certa banda.

Una elevata selettività, come vedremo al paragrafo seguente, va a discapito della fedeltà di riproduzione del segnale.

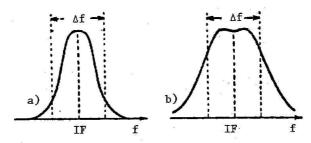
Negli apparati per applicazioni militari, si preferisce avere una buona selettività per poter disporre di un
elevato numero di canali, potendo tollerare la minor
qualità dei segnali grazie al fatto che gli utenti sono
operatori professionisti.

(3) Fedelta

La fedeltà esprime il grado di accuratezza con cui il ricevitore riproduce in uscita il segnale di bassa frequenza; fedeltà è sinonimo di uniforme riproduzione delle varie frequenze che compongono il segnale. Essa dipende quindi sia dall'amplificatore di bassa frequenza sia dalla curva di risposta dell'amplificatore IF. Poichè da quest'ultima curva dipende anche la selettività, ne deriva che la fedeltà del ricevitore è antitetica con la selettività nel senso che più un ricevitore è selettivo meno è fedele.

Se la curva di risposta dei circuiti di media frequenza avesse l'andamento ideale di fig.23 con Afuguale alla larghezza del canale di frequenza dell'oscillazione modulata, tutte le frequenze che compongono lo spettro di modulazione sarebbero trattate ugualmente, per cui il segnale non risulterebbe in alcun modo alterato. La selettività sarebbe poi perfetta perchè, anche se esistesse un canale di frequenza strettamente adiacente a quello desiderato, questo risulterebbe completamente scartato. Nel caso reale invece di fig.30 la risposta alle varie frequenze entro l'intervallo Δ f, non è uniforme e risultano depresse le componenti laterali più discoste dalla portante, che corrispondono alle frequenze più elevate dello spettro del segnale; contemporaneamente la

selettività non è più perfetta perchè la risposta fuori dell'intervello Δf non è completamente nulla. Nell'intento di migliorare la selettività si può rendere acuta la curva di risposta, nel modo indicato nella fig. 30.a; con ciò però si riduce inevitabil mentela fedeltà in quanto si attenuano sostanzialmente le componenti date dai toni alti.



- Curve di risposta IF -

- Fig.30 -

Si si vuole invece aumentare la fedeltà si può allargare la curva di risposta (fig. 30 b) riducendo però inevitabilmente la selettività; giungono in tal caso al rivelatore non soltanto le oscillazioni che compongono lo spettro di modulazione corrispondente alla trasmissione desiderata, ma anche le oscillazioni appartenenti a canali adiacenti.

Tali oscillazioni indesiderate, battendo con quelle volute, provocano all'uscita del ricevitore dei noiosi fischi.

Nelle trasmissioni radiofoniche, ove di sovente vengono trasmessi programmi musicali, è necessario assicurare una fedele riproduzione dei suoni, salvaguardando quindi anche i toni più alti; pertanto si deve ricorre a canali di larghezza di banda adeguata in relazione alla esigenza di curare un buon ascolto da parte degli utenti.

Come già detto a proposito della modulazione, nella banda di diffusione radio MF (550 ÷ 1600 KHz), ove si utilizza la AM, i canali hanno un larghezza di banda di 10 KHz; mentre nella banda VHF (88 ÷ 108 MHz), ove si utilizza la FM, i canali hanno una larghezza di banda di 180 KHz.

Data la maggior larghezza di banda a disposizione ed i pregi della modulazione FM, appaiono evidenti i motivi per cui nei canali VHF - FM la qualità del segnale ricevuto sia decisamente superiore rispetto a quella dei canali MF - AM.

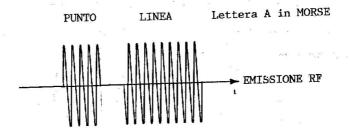
6. - PRINCIPALI TIPI DI EMISSIONE

a. - Radiotelegrafia Morse

(1) Come ben noto, l'alfabeto Morse consiste nel codificare le lettere con linee e punti.

Per le applicazioni nelle telecomunicazioni, la trasmissione Morse si può effettuare molto semplicemente emettendo una portante per periodi relativamente corti o lunghi in corrispondenza rispettivamente dei punti e delle linee, non emettendo nelle pause tra un simbolo ed un altro.

A titolo di esempio, in Fig 31 è riportato il segnale corrispondente alla lettera A.



- Trasmissione Morse CW -

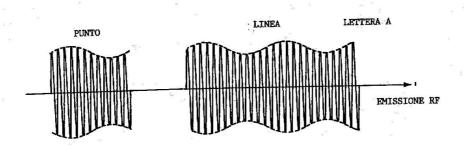
- Fig.31 -

Tale tipo di trasmissione consiste quindi nell'inviare o meno, una frequenza portante <u>non modulata</u> che prende il nome di onda continua, meglio nota con il termine inglese <u>CW</u> (Continuous Wave).

D'altra parte, osservando la Fig 31, si può rilevare come la forma d'onda risultante sarebbe la stessa di quella prodotta da una modulazione di ampiezza con segnale modulante rettangolare e profondità di modulazione m = 100 %.

In ricezione la presenza o meno della portante deve essere segnalata all' operatore; uno dei metodi più diffusi consiste nel fatto che il ricevitore genera un caratteristico tono udibile, della frequenza di 1000 Hz, in concomitanza della presenza della portante.

(2) Un altro metodo per effettuare il Morse, consiste nel trasmettere la portante già modulata in ampiezza con il tono di 1 KHz (Fig 32).



- Trasmissione Morse MCW -

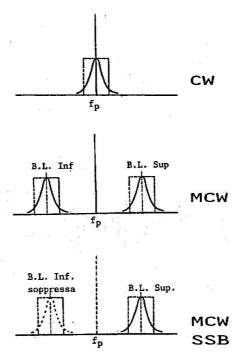
- Fig. 32 -

In tal modo il ricevitore AM deve semplicemente demodulare la portante per ottenere il segnale audio udibile dall'operatore.

Tale modalità che sta attualmente completamente soppiantando il CW, prende il nome di Manipulated Continuous Wave (MCW).

Nella terminologia telegrafica, con il termine "manipolazione" si indica la "modulazione" della portante.

Nella banda HF, ove si impiega la modalità SSB, la banda laterale inferiore e la portante vengono soppresse, per cui viene emessa una sola banda, ad es. la superiore; pertanto la rappresentazione spettrale del MCW diviene del tutto simile a quella del CW, con la differenza che, a parità di frequenza portante, il centro banda della MCW risulta essere di 1 KHz superiore a quello della modalità CW (Fig. 33).



- Spettri delle modalità morse. -

- Fig. 33 -

(3) La tecnica Morse, già impiegata dalla 2^{metà} del secolo scorso per la telegrafia via filo, dagli inizi del 1900 è stata adottata anche per la trasmissione di messaggi via radio, costituendo per anni l'unico sistema di comunicazione a bordo delle navi.

Dato che le parole devono essere codificate (con linee e punti), il Morse richiede operatori specializzati, detti Marconisti o Radiotelegrafisti, sia per trasmettere che per ricevere.

Attualmente, con l'evolversi della Radiotecnica, la maggior parte delle comunicazioni nave-terra e nave-nave vengono effettuate con la radiotelegrafia con telescrivente e per mezzo della trasmissione diretta della voce, mentre il <u>CW</u> e l'<u>MCW</u> vengono sempre meno utilizzati.

b. - Radiotelegrafia con telescrivente

(1) La telescrivente (Tele Type Writer - Sigla TTY) è un apparato di estrema utilità in quanto consente la ricetrasmissione diretta di messaggi in forma scritta e trova numerose applicazioni nelle comunicazioni di tipo civile e militare.

La telescrivente può essere impiegata per collegare tra di loro direttamente due utenti (collegamento punto-punto), oppure può essere utilizzata per comunicazioni via filo di tipo commutato, a similitudine di quanto avviene con l'apparecchio telefonico, per cui si può trasmettere un messaggio ad un utente desiderato previa selezione del numero del destinatario (questo servizio prende il nome di TELEX).

Nel caso di trasmissioni via radio la modalità telegrafica prende in nome di RATT (sigla di RAdio Tele Type).

La telescrivente è munita di una tastiera dattilografica (Fig. 34), molto simile ad una comune macchina da scrivere, sulla quale l'operatore batte il messaggio da trasmettere.



Esempio di telescrivente.

- Fig. 34 -

In ricezione la macchina batte automaticamente i caratteri ricevuti sulla carta inserita nell'apposito rullo.

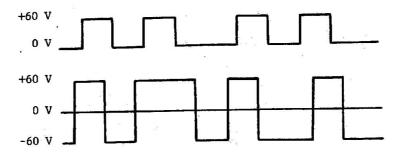
Grazie a questa caratteristica di funzionamento, la telegrafia con telescrivente può essere effettuata anche senza dover ricorrere ad operatori specializzati.

(2) Anche con questo sistema le lettere dell'alfabeto, i numeri, i segni d'interpunzione ecc. vengono convertiti in segnali elettrici idonei al successivo trasferimento su di una linea di trasmissione.

A differenza della tecnica Morse, però, la conversione caratteri/segnali elettrici avviene automaticamente senza l'intervento dell'operatore, in quanto è la telescrivente stessa che ad ogni carattere fà corrispondere un segnale codificato. In ricezione la stessa macchina riconverte i segnali elettrici nel movimento meccanico di stampa dei segnali trasmessi.

Il segnale codificato consiste in una serie di impulsi di corrente generati da un dispositivo elettrico che può operare in due differenti maniere (Fig. 35).

(a) apertura e chiusura del circuito (presenza e assenza di corrente), detta corrente semplice; (b) scambio di polarità + e - di un circuito (impulsi di segno opposto) detta corrente doppia.

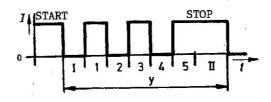


- Trasmissione a corrente singola e doppia. -

- Fig. 35 -

(3) Gli impulsi elettrici relativi a ciascun simbolo sono
5 (detti di codice) più 2 impulsi supplementari di sinconismo detti di "start" e di "stop", di cui il primo
precede ed il secondo segue i 5 impulsi di codice (Fig. 36)

Questi due impulsi di sincronismo consentono di avviare ed arrestare, all'arrivo di ogni gruppo di segnali costituenti un carattere, gli organi di ricezione e stampa.



- Fig. 36 - Carattere telegrafico.

L'impulso di stop può avere una durata (T) uguale agli altri impulsi oppure più comunemente può essere prolungato di 0,5 T.

Gli impulsi di codice sono detti di "lavoro" o di "riposo", secondo il seguente quadro:

	CORRENTE SEMPLICE	CORRENTE DOPPIA
IMPULSO DI RIPOSO	PRESENZA DI CORR.	IMPULSO POSITIVO
IMPULSO DI LAVORO	ASSENZA DI CORR.	IMPULSO NEGATIVO

(4) La durata dell'impulso e di conseguenza la velocità di trasmissione è misurata con l'unità di misura "Baud", abbreviazione del nome di Emile Baudot, inventore di uno dei primi tipi di apparati per telegrafia.

Il Baud esprime il numero degli impulsi elementari contenuti in un secondo. La velocità di 50 Baud significa, ad esempio, che in un secondo sono contenuti 50 impulsi elementari e che, di conseguenza, la durata del singolo impulso è di 1/50 di sec., ossia di 20 millesimi di secondo (ms).

Dalla velocità telegrafica, espressa in Baud si può così ricavare la velocità di trasmissione e cioè il numero di caratteri (lettere, numeri etc) che la macchina può emettere al minuto primo.

Ad esempio con la velocità di 75 baud (la più utilizzata nelle applicazioni della Marina Militare),

In un minuto possono essere trasmessi:

$$\frac{75\times60}{7.5} = 600 \text{ Caratteri}$$

Avendo considerato che per ciascun carattere occorrono 7,5 impulsi elementari (1 di start, 5 di codice e 1,5
di stop).

(5) I cinque impulsi di codice, come già detto al paragrafo (3) sono costituiti da combinazioni di impulsi che possono essere di due tipi: riposo e lavoro.

Pertanto tutte le possibili combinazioni sono date da:

$$2^5 = 32$$

Il numero di 32 differenti combinazioni è troppo basso per poter rappresentare le 26 lettere dell'alfabeto inglese, le 10 cifre ed i segni di interpunzione.

Per trasmettere un maggior numero di segni con le combinazioni a disposizione viene utilizzato il seguente artificio.

A 26 delle 32 combinazioni viene fatto corrispondere un doppio significato: come lettera o come cifra/segno di interpunzione; ad esempio allo stesso codice può corrispondere la lettera "E" oppure la cifra "3". Il significato "lettere" o "cifre" viene preselezionato per mezzo di 2 delle restanti 6 combinazioni, pertanto una serie di lettere deve essere preceduta dal codice
"lettere", volendo ad un certo punto del testo inserire
dei numeri questi devono essere preceduti dal codice
"cifre".

Tale preselezione nei vecchi tipi di telescrivente avveniva in forma manuale per mezzo degli appositi comandi presenti sulla tastiera (A.....) (lettere) e (1....) (cifre).

Nelle più moderne realizzazioni la preselezione avviene in forma automatica premendo semplicemente sulla tastiera una lettera o un numero.

Delle restanti 4 combinazioni, una viene utilizzata per lo spazio tra parole, una per il ritorno carrello, una per l'interlinea mentre la 32°, costituita da 5 impulsi di lavoro, non viene utilizzata.

Il codice internazionale a 5 simboli maggiormente utilizzato è il codice ITA 2 (International Telegraphic Alphabet n. 2) (Fig. 37), detto anche alfabeto Murray dal nome del suo inventore.

Alfabeto No. 2 a codice di 5 unità del CCITT

_					1m	_			λ		e e
	LTRS	CFRS	5	4	3		2	7	1		8
7	A	-	-			•	•	•	Įį.		ell.
	В	3		•		•		•	()		G
•	C	1	一	•	•	•	•				
•	۵	먑		•		•	~	•			
	E	3				•		•	_		
	F	•			•	•		•	1	===	Lettere
7	G	%				•	•	,			8 8
•	Н				•	•			1	=	Cifre
•	1	8	T		•	•	•		-		
10	J	R	1			•	•	•	<	=	Ritorno carrello
11	K	(1			•		•	_		
u	L	1		1	Ť	•			=	_	Interlinea
	M		•			•		Г			Trans.
H	N		T				Г		ESP	=	Spazio
15	0	9				•		Г	ESF	_	DPALIO
M	P	0			•	•	•		-17		off: 1.0
17	Q	1	۱ě	1		•			中		Chi è i
*	R	4	╅					•			_
	S		+-	Ť	•	•	Ť	•	· 55	==	Campanello
20	T	5		1	Ť	•	┢				
21	Ü	7	╁	T				•	*	=	Non utilizzato
22		╁			i		ě	Ī	8110 8		
-	-	2		1	1		•			n 7	20
25		17	Ť				1				
-	-	6		1=			T	•			
I		+	13	+	╀		1				
27		\ .	╀		1		+	╁		=	Foro - Impulso di RIPOSO
21		<u> </u>	+	╁	+	1.		1			
10		J.	1	•		•	•	•		=	Assenza di foro - Impulso
30		1	•	0)						di LAVORO
31		ESP.	Ι			•					
34		*	Ι		L			1		5	Foro di trascinamento

(6) Un testo telegrafico scritto con l'alfabeto ITA 2 può essere memorizzato su di un nastro perforato.

Su tale nastro i cinque impulsi di riposo e di lavoro corrispondenti a ciascun carattere vengono rappresentati rispettivamente con la presenza o l'assenza di un foro.

Nell'esempio di fig. 38 è stato rappresentato un tratto di nastro (denominata in gergo TLC "zona") su cui è stato scritto "D. Murray", in particolare si notino i codici che annunciano lo scambio "lettere" e "cifre" (quest'ultimo comprende anche i segni di interpuzione).

passo	D segni, cifre punto hettera spaziatura A V S S S S S S S S S S S S S S S S S S
1 2	00 0 0 00
	0000000000000000
3	00000 00
3 4 5	00 0 0000

- Fig. 38 - Nastro perforato.-

Nella zona viene perforata anche una serie continua di piccoli fori che servono unicamente al trascinamento meccanico del nastro.

Il nastro perforato viene prodotto, tramite apposito punzonatore detto "unità nastro" compreso nella stessa telescrivente il quale può essere messo in funzione "sia quando si trasmette sia quando si riceve un messaggio.

La "zona" così ottenuta può essere utilizzata per conservare un messaggio oppure per ritrasmetterlo in forma automatica.

per ritrasmettere il messaggio è necessario utilizzare un dispositivo in grado di leggere la presenza o meno dei fori, riconvertendoli in impulsi elettrici (riposo e lavoro).

Tale dispositivo prende il nome di trasmettitore automatico che può essere un apparato a sè stante oppure può essere conglobato nella telescrivente stessa.

(7) Nelle pratiche applicazioni la telescrivente può utilizzare come mezzo di trasmissione i cavi elettrici oppure le onde elettromagnetiche.

Nel primo caso gli impulsi di riposo e di lavoro vengono trasmessi in forma elettrica applicando sulla linea le tensioni \emptyset V; + 60 V (nel caso di corrente semplice) oppure - 60 V; + 60V (nel caso di corrente doppia).

Volendo però inviare il messagio via radio occorre convertire i due valori di tensione in segnali idonei alla modulazione di una portante.

Uno dei metodi più diffusi, tra l'altro adottato dalla Marina Militare, consiste nella cosidetta RATT a due toni.

Con tale tecnica all'impulso di riposo ed a quello di lavoro viene fatto corrispondere un particolare tono audio con il quale si modula una portante a radiofrequenza.

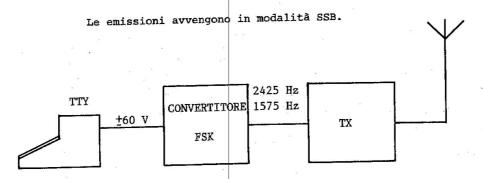
Il tono associato all'impulso di riposo prende il nome di Mark ; mentre quello associato all'impulso di lavoro prende il nome di space (Fig. 39)



- Fig. 39 -

L'apparato che converte le correnti telegrafiche in toni audio, e viceversa in ricezione prende il nome di "convertitore FSK" (Fig. 40) dove FSK sta per "Frequency Shift Keyning).

Nelle tramissioni HF i due toni hanno tipicamente il valore di 2425 (SPACE) e 1575 (MARK) generati dalla variazione di ± 425 Hz di un tono centrale in riferimento di 2000 Hz.



- Fig. 40 - Convertitore FSK.-

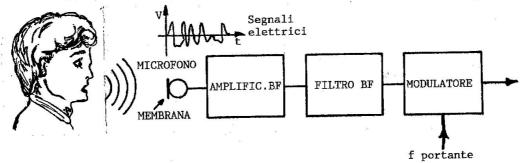
Nella banda UHF invece i due toni hanno tipicamente i valori di 500 Hz (Mark) e 700 Hz (Space) con modulazione AM.

La corrispondenza che associa la frequenza più elevata del tono modulante alla funzione space/assenza di foro-corrente di lavoro ed a quella più bassa la funzione Mark (presenza di foro - corrente di riposo) può essere invertita.

c. - Fonia

(1) Nelle comunicazioni in fonia il messaggio che viene inviato e ricevuto è costituito dalla viva voce dell'operatore.

Il dispositivo che converte, in trasmissione, la voce in idonei segnali elettrici per modulare (in AM o FM) una portante è il microfono (Fig. 41).

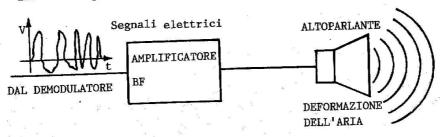


- Fig. 41 - Blocco trasmettitore.-

Il simbolo circuitale del microfono è riportato in fig.41, esso rappresenta una membrana che per effetto delle sollecitazioni ricevute a causa delle variazioni di pressione dell'aria provocate dalla voce dell'operatore, genera o fa variare una grandezza in un circuito detto di "bassa frequenza".

(2) Nei microfoni più comuni, ad effetto elettromagnetico, gli spostamenti della membrana fanno sì che venga generata una tensione che riproduce, come andamento nel tempo, le stesse variazioni della pressione acustica in aria.

Le tensioni così prodotte generalmente non sono idonee per modulare direttamente la frequenza portante, il segnale pertanto viene amplificato in un amplificatore BF ed opportunamente filtrato per rispettare i vincoli di larghezza di banda del canale a radiofrequenza. (3) All'atto della ricezione viene effettuata l'operazione inversa di quella descritta in precedenza (Fig. 42).



- Fig. 42 - Blocco ricevitore.-

Il segnale elettrico proveniente dal demodulatore, dopo un'opportuna amplificazione viene inviato in un altoparlante.

L'altoparlante è costituito da un dispositivo elettromagnetico alimentato dal segnale sopraddetto.

Al variare del segnale il dispositivo elettromagnetico attira e respinge una membrana la quale così facendo riproduce in aria le stesse variazioni di pressioni acustiche del suono originato in trasmissione.

(4) Le trasmissioni in fonia trovano tutt'ora un larghissimo impiego sia nelle comunicazioni civili sia in quelle militari.

d. - Trasmissione dati

(1) Generalità

I sistemi di comunicazione di tipo numerico o digitale sono in continua espansione sia per la crescente
diffusione di sorgenti di informazione capaci di fornire
dati in forma numerica (BIT) (v. calcolatori, telescriventi, ecc.) sia perche i processi digitali si sono estesi
anche alle sorgenti di tipo analogico (audio, video,
telemetria, ecc.).

Questo orientamento trova motivazioni nella maggior flessibilità di impiego e varietà di soluzioni attribuibili alle tecniche digitali e nella tecnologia dei circuiti integrati che le supporta.

Nei sistemi di tipo analogico viene effettuata la trasmissione di segnali caratterizzati da andamento continuo nel tempo.

Nei sistemi di comunicazione digitali sono impiegati, invece, simboli discreti (0;1) provenienti da sorgenti di informazione che generano dati numerici o da sorgenti analogiche digitalizzate.

(2) Modulazioni digitali

I dati in uscita dai dispositivi digitali (calcola-

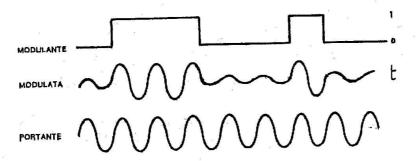
tori, ecc. sono caratterizzati dai livelli logici "Ø" e "1", corrispondenti fisicamente a valori di tensioni continue.

Poiche il canale di comunicazione è tipicamente a struttura analogica, occorrono particolari tecniche che effettuano una "traduzione" di segnali digitali in segnali analogici o comunque adatti a modulare una portante.

Le tecniche di modulazione digitale sono essenzialmente di tre tipi: modulazione a spostamento di ampiezza
(amplitude shift Keying), a spostamento di fase (Phase
Shift Keying) ed a spostamento di frequenza (Frequency
Shift Keying).

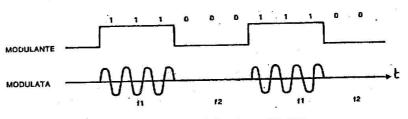
(a) Amplitude Shift Keying (A.S.K.)

Con questa modulazione gli stati "0" e "1" di un segnale digitale vengono convertiti in due differenti ampiezze (livelli di tensione, Fig. 43). Normalmente la tensione più bassa rappresenta lo "o" logico.



- Fig. 43 - Modulazione A.S.K.

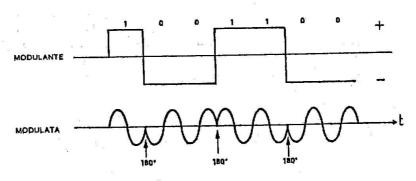
Un caso particolare di questo tipo di modulazione è costituito dalla modulazione ON-OFF, nella quale al livello logico "o" corrisponde l'assenza del segnale (v. Fig.44).



- Fig. 44- Modulazione ON-OFF.

(b) Phase Shift Keying (P.S.K.)

E' un tipo di modulazione in cui ad una variazione del segnale digitale in ingresso corrisponde una variazione di fase della portante (Fig.45).



- Fig.45 - Modulazione P.S.K.

I valori di fase descritti possono essere 2 (ad es. 00° - 180°) nella modulazione bifase, o potenze di 2 (ad es. 4, 8 etc.); per ottenere velocità di trasmissione più elevate a parità di banda disponibile si possono utilizzare modulazioni di fase multilivello (4 PSK,8 PSK), nelle quali ad ogni valore istantaneo di fase della portante corrispondono2 bit (nella 4 PSK) Q. 3 Bit (nella 8 PSK) etc. Ad esempio: per un segnale 4 PSK la relazione tra codice binario e fase e del tipo riportato in Tab. 1.

CODICE	FASE DI			
BINARIO	USCITA			
00	0°			
01	90°			
11	180°			
10	270°			

- Tab. 1 -

In fig. 46 sono riportate alcuni esempi di tipiche rappresentazioni vettoriali di segnali 2 PSK, 4 PSK, 8 PSK.

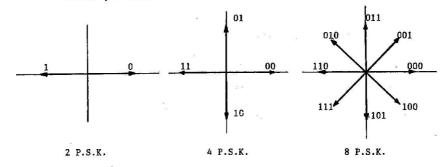
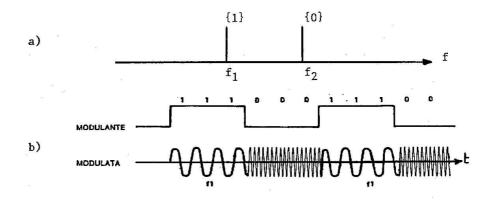


Fig. 46 Rappresentazioni vettoriali di tipici segnali modulati in P.S.K.

(c) Frequency Shift Keying (F.S.K.)

Con questo tipo di modulazione, gli stati "O" e
"1" di un segnale digitale vengono convertiti in due
differenti frequenze (v. Figg. 47-48)

Ad esempio alla frequenza più bassa può essere associato lo stato "1" ed a quella più alta lo stato " ϕ ".



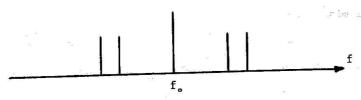
- Fig. 47- 48 Spettro e forma d'onda di un segnale F.S.K.

Anche la FSK può adottare tecniche di modulazione multilivello, nelle quali ad esempio si possono utilizzare 4, 8, 16 etc. differenti frequenze di shift.

Ovviamente in tal caso ad ogni frequenza corrispondono più BIT (ad es. 2 nel caso 4 FSK o 3 in 8 FSK etc.).

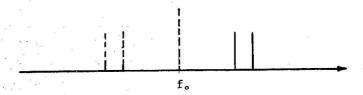
Un tipo particolare di F.S.K. è quello utilizzato per le trasmissioni RATT (RAdio-Tele-Type) in banda HF e quindi con modalità SSB.

Con questa tecnica detta RATT a due toni, si modula la portante con due toni audio (Fig.49), uno denominato MARK e l'altro SPACE.



- Fig. 49- RATT a due toni in AM

Modulando in SSB, una banda laterale e la portante, vengono soppresse, cosicche in aria sono presenti solo due righe (Fig.50). Lo spettro risultante pertanto è del tutto simile a quello F.S.K. precedentemente descritto.

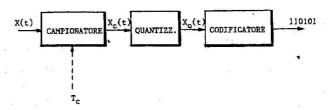


- Fig. 50 - RATT a due toni in SSB

(3) Convertitore Analogico Digitale

Le modulazioni digitali trattate nel paragrafo precedente possono applicarsi a tutti i segnali numerici (BIT) e quindi anche ai segnali analogici convertiti in numerici attraverso opportuni processi digitali. Poichè le trasmissioni digitali sono maggiormente immuni dai disturbi, in quanto il ricevitore deve poter riconoscere il segnale tra un numero finito di stati (ad. es; l'una o l'altra di due frequenze) attualmente si preferisce trasformare i segnali dalla forma analogica in quella numerica.

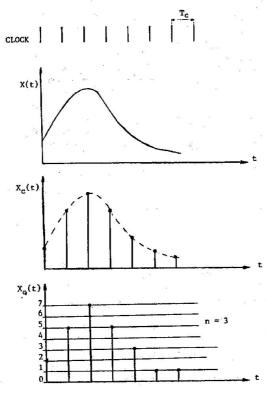
Lo schema a blocchi di un convertitore analogico digitale è riportato in Fig. 51



- Fig. 51- Schema a blocchi di un convertitore analogico digitale

Il segnale analogico x (t) (Fig. 52) viene campionato con un periodo di clock pari a Tc. Il segnale così ottenuto viene quantizzato a 2^n livelli (ad es. n=8). Il codificatore converte il segnale quantizzato (X_q (t)) in stringhe di bit, associando ad ogni livello n bit.

Tale tecnica prende il nome di pulse code Modulation (PCM); allo scopo di riprodurre fedelmente il segnale la frequenza di campionamento f= 1/Tc non può essere più bassa di un certo limite, ma deve soddisfare la seguente



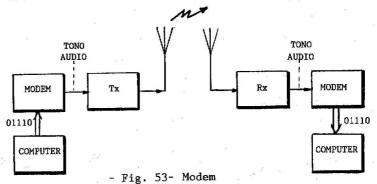
condizione: fc ≥ 2fm MAX (teorema del campionamento), dove fm MAX é la componente di frequenza più alta del segnale da campionare. Ovviamente in ricezione il ricevitore effettua l'operazione inversa per riottenere il segnale originale.

- Fig. 52 - Conversione analogico digitale con tecnica PCM.

(4) Modem

Il MODEM (Modulation DEModulation) è un dispositivo che accetta dati da un computer in forma di segnali digitali e li trasforma in forme adatte alla trasmissione attraverso una linea di telecomunicazione (Fig. 53).

Un altro MODEM all'altro capo della linea trasforma i dati nella loro forma numerica originale.



Ad esempio per modulare normalmente una portante può essere conveniente utilizzare un tono audio, in tal caso il segnale numerico può far variare la fase di questo tono.

Nel caso in cui l'uscita analogica del MODEM è costituita da un solo tono allocato nella banda audio e modulata sequenzialmente con una delle tecniche digitali viste al paragrafo b), il MODEM si dice Seriale.

Nel caso invece che l'uscita del modem sia costituita dall'emissione simultanea di un insieme di più toni, ciascuno dei quali modulato, il modem si dice parallelo.

Ad esempio con 16 toni, ciascuno dei quali modul ato in fase (0 - 180°), si avrà una trasmissione simultanea di 16 BIT.

(5) Larghezza di banda

Nelle comunicazioni di tipo digitale la velocità di trasmissione dei bit influisce sullo spettro del segnale e quindi sulla occupazione di banda.

Difatti per effettuare trasmissioni con velocità elevate occorre ridurre la durata T dei singoli bit il che comporta l'aumento della larghezza di banda dall'emissione.

Ne consegue quindi che, per una determinata larghezza di banda del canale, la velocità di trasmissione dei dati risulta limitata superiormente.

e. - Designazione delle classi di emissione

- (1) In ambito internazionale allo scopo di poter rapidamente e semplicemente definire ogni possibile emissione è stata assegnata a ciascuna di esse una sigla con la quale è possibile identificare:
 - a il tipo di modulazione (AM, FM o impulsiva);
 - b il tipo di comunicazione (morse, tty, fonia, tv, dati etc);

 - d la presenza o meno di una banda laterale, etc.
- (2) In considerazione del vertiginoso evolversi del mondo delle comunicazioni in questi ultimi anni, in special modo per quanto concerne le trasmissioni digitali, la designazione delle emissioni è stata di recente radicalmente modificata.

Pertanto al momento uno stesso tipo di emissione si può trovare su differenti testi, monografie, apparati etc. indicata con la vecchia oppure con la nuova designazione.

Ad esempio una trasmissione in fonia in SSB nella vecchia designazione viene indicata con A3J mentre nella nuova si indica con J3E.

(3) In appendice n. 1 sono dettagliamente riportate le spiegazioni della vecchia e nuova designazione ed una tabella comparativa tra le due.

7. - CENNI SULLE ANTENNE

a. - Generalità

Per antenna si intende un conduttore o un sistema di conduttori la cui funzione, in trasmissione, è quella di trasformare le correnti a radiofrequenza che la percorrono in onde elettromagnetiche che si propagano nello spazio libero; viceversa in ricezione la sua funzione è quella di captare le onde elettromagnetiche provenienti dallo spazio divenendo sede di correnti ad alta frequenza.

In altre parole l'antenna è un organo di accoppiamento tra l'apparato trasmittente e/o ricevente e lo spazio libero e quindi costituisce uno degli elementi più importanti di un sistema di comunicazione.

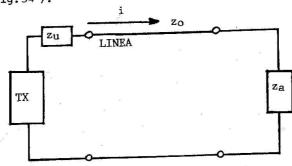
Lo studio delle antenne, a causa della complessità dei fenomeni fisici ad esse correlate, delle svariate forme ed applicazioni che queste possono avere e dei differenti modi in cui possono essere viste funzionalmente, è estremamente vasto e complesso, pertanto nel presente capitolo ci limiteremo ad esporre alcuni aspetti fondamentali sull'argomento.

b. - L'elemento antenna

Abbiamo in precedenza accennato ai diversi modi in cui l'antenna può essere vista, ai punti che seguono ne elencheremo i più importanti.

(1) Dal trasmettitore

L'antenna è vista come una impedenza di carico z_a che chiude la linea (fig.54).

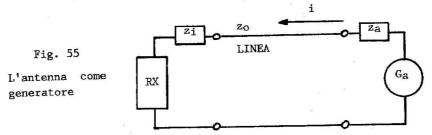


- Fig. 54 - L'antenna come carico -

Se l'impedenza di uscita $z_{\rm u}$ del trasmettitore e l'impedenza $z_{\rm o}$ e $z_{\rm a}$ sono uguali, si ha il massimo trasferimento di potenza dal trasmettitore all'antenna.

Se invece z_a differisce da z_0 e/o da z_u non tutta la potenza Pt viene trasferita all'antenna e pertanto si ha la formazione dell'onda riflessa e di onde stazionarie sulla linea. Come meglio si vedrà in seguito l'impedenza z_a , non è fissa ma varia con la frequenza, non solo in modulo ma anche in fase, per cui la stessa antenna al variare di "f" può apparire come un carico resistivo, capacitivo o induttivo.

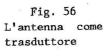
(2) Per il ricevitore invece l'antenna costituisce un generatore di segnali (G a) a radiofrequenza con bassissimi valori di tensione (tipicamente dell'ordine dei μ V) (Fig.55).

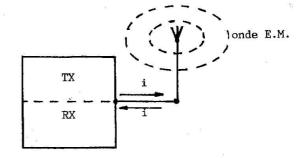


Il ricevitore pertanto viene visto dal "generatore antenna" come una impedenza. Anche in questo caso per far sì che il sistema sia adattato la resistenza di ingresso del ricevitore deve essere uguale a z_0 ed a z_a .

All'atto pratico però in ricezione, le potenze in gioco sulla linea sono talmente basse che la formazione di onde stazionarie viene ampiamente tollerato.

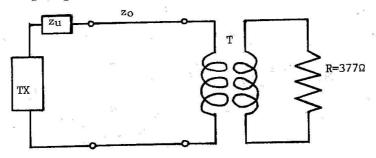
(3) Come in precedenza accennato, la funzione dell'antenna è quella di un trasduttore (fig. 56).





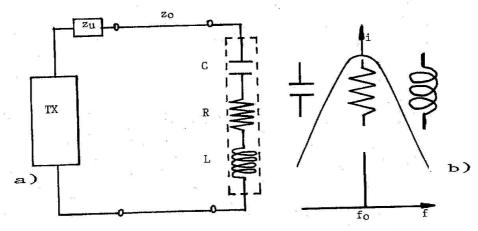
Essa trasforma tensioni e correnti presenti sulla linea in onde e.m. e viceversa.

(4) Essendo l'impedenza del vuoto o aria non ionizzata = 377 Ω (vedasi paragrafo l.h.a pag. 13)e l'impedenza della linea tipicamente 50 Ω o 75 Ω , l'antenna si comporta come un trasformatore di impedenza "T" che adatta l'impedenza del vuoto a zo e zu (fig.57).



L'antenna come trasformatore di impedenza. Fig. 57

(5) Dal punto di vista della frequenza l'antenna in generale può essere vista come un circuito risonante serie (Fig.58a).



-Fig. 58 - L'antenna come circuito risonante -

Come noto si definisce frequenza risonante " f_0 " quella frequenza per cui la reattanza induttiva " XL" è uguale a quella capacitiva " XC", per cui nella espressione dell'impedenza complessiva Z

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}$$

la componente reattiva si annulla, ed il circuito appare semplicemente come una resistenza R.

In tali condizioni la corrente nel circuito è massima (Fig. 58b)

Dall'uguaglianza $X_L = X_C$

si ricava l'espressione della frequenza di risonanza, difatti: $X_L = \omega L$ $X_C = 1/\omega C$;

$$\omega_0 L = 1/\omega_0 C \qquad \qquad \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$$

$$f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC} \quad ;$$

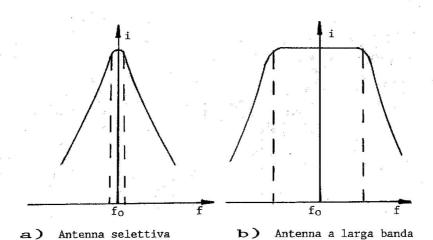
per frequenze f < f₀
per frequenze f > f₁

 $f < f_0$ l'antenna risulta capacitiva; $f > f_1$ l'antenna risulta induttiva.

In entrambi i casi la corrente nel circuito diminuirà in quanto al valore di resistenza R si sommerà quello della reattanza prevalente $X_{\rm L}$ o $X_{\rm C}$.

L'acutezza della curva, riportata in fig. 58-b definisce una caratteristica molto importante dell'antenna, quella della sua larghezza di banda.

Una antenna con una curva del tipo riportato in fig.59-a si dirà selettiva, in quanto presenta un comportamento resistivo in un ristretto intorno della frequenza di risonanza, mentre un'antenna con curva del tipo indicato in fig.59-b si dirà a larga banda.



- Fig. 59 - Curve di risonanza -

c. - IL dipolo Hertziano

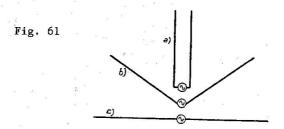
(1) Il tipo di antenna fondamentale per la teoria dell'antenna ed anche il più semplice è il dipolo Hertziano (Fig. 60).



- Fig. 60 - Il dipolo Hertziano -

Esso è costituito da due elementi conduttori alimentati da un generatore a radiofrequenza.

Questo tipo di antenna si può pensare come derivato da una linea in quarto d'onda aperta (Fig. 61).



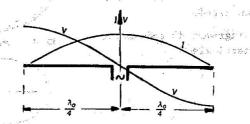
Da quest'ultima esemplificazione si può ricavare un'importante caratteristica del dipolo:quella che se si vuol trasmettere correttamente la frequenza $f_0 \qquad \text{il dipolo dovrà avere una lunghezza complessiva} \quad \text{di } \lambda/2 \;.$ Per la giustificazione di quanto sopra, omessa per brevità, si

rimanda alla teoria delle linee.

Tale antenna prende pertanto il nome di dipolo a mezz'onda.

(2) Facendo riferimento alla teoria delle linee, dato che a ciascun estremo del dipolo si dovrà avere un nodo di corrente (corrente nulla), a distanza λ/4 , cioè al centro, si avra un ventre (corrente massima) (fig. 62).

- Fig. 62 Distribuzione di tensione e comente in un dipolo $\lambda/2$.



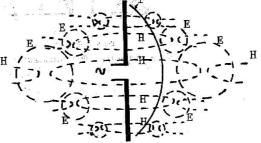
Dato che massimi e minini di corrente corrispondono rispettivamente a minimi e massimi di tensione, questa sara massima all'estremità del dipolo e minima nel punto di alimentazione.

Nella fig. 62 all'ampiezza della tensione è stato attribuito segno opposto nelle due metà del dipolo per indicare che le oscillazioni della tensione hanno, istante per istante, fase opposta.

esprimono gli andamenti dei valori efficaci di tensione e corrente, in quanto queste sono grandezze alternate a frequenza f

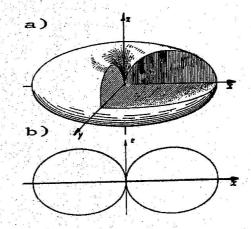
(3) In corrispondenza della massima distribuzione di corrente si avrà la massima generazione di campi elettromagnetici. (Fig. 63).

- Fig. 63 - Irradiazione di un dipolo



Pertanto l'irraggiamentonello spazio di un dipolo sarà del tipo rappresentato in fig.64 detto solido di radiazione.

- Fig. 64
- a) solido di radiazione di un dipolo
- b) diagramma di radiazione verticale

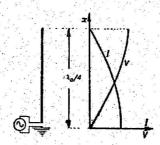


Il dipolo pertanto presenta radiazione massima in corrispondenza del punto di alimentazione e nulla alle estremità.

Nella sezione orizzontale inoltre la radiazione è uniforme (omnidirezionale). Mentre nel piano verticale la radiazione ha l'andamento rappresentato in fig. 64/B.

d. - Il Monopolo Marconiano

(1) Un altro tipo di antenna molto diffuso è il cosiddetto monopolo $\lambda/4$, generalmente costituito da un conduttore verticale alimentato da un generatore RF collegato ad un piano riflettente di riferimento (Fig. 65).

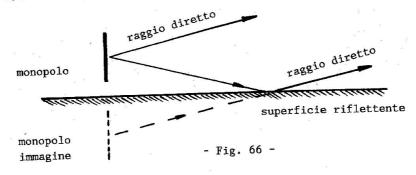


- Fig. 65 -Il monopolo Marconiano

(2) Il principio di funzionamento di questa antenna è riconducibile a quello del dipolo precedentemente esaminato.

Difatti le onde irradiate verso il basso dal monopolo vengono riflesse dal piano conduttore in maniera speculare (Fig. 66) per cui queste sembrano pervenire da una sorgente simmetrica al monopolo , rispetto al piano.

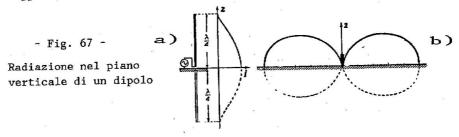
Pertanto il monopolo in prossimità di una superficie riflettente, con la sua immagine, è riconducibile ad un dipolo a $\lambda/2$ in campo libero.



La distribuzione di corrente nel monopolo è nulla all'estremità e massima nel punto di alimentazione (fig. 65).

(3) Ovviamente al di sotto del piano conduttore non si ha radiazione di energia, pertanto si può facilmente intuire che con il monopolo è possibile ottenere la stessa intensità di campo, nel semipiano superiore, di quella di un dipolo irradiando metà della potenza.

Il diagramma di radiazione sul piano orizzontale è sempre una circonferenza mentre sul piano verticale si avrà quello rappresentato in fig.67B.

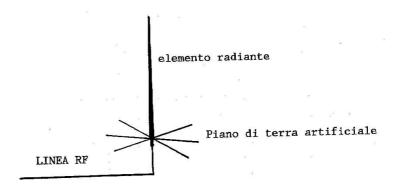


(4) La superficie riflettente fin qui considerata nelle bande LF, MF, HF, è costituita dal suolo, che pertanto almeno nelle immediate vicinanze dell'antenna, dove il campo E.M. è più intenso, deve essere un ottimo conduttore (ad esempio il mare), per ottenere una buona onda di superficie.

Dovendo installare antenne su terreni cattivi conduttori, spesso si rende necessario interrare una rete metallica al fine di costituire una adeguata superficie riflettente in prossimità dell'antenna.

Nelle bande di frequenza più alte ad esempio VHF, UHF, dovendo posizionare le antenne in posizioni elevate per far si che il propagarsi avvenga per onda diretta, la superficie riflettente del semidipolo viene realizzata con elementi conduttori disposti a raggiera (Fig. 68).

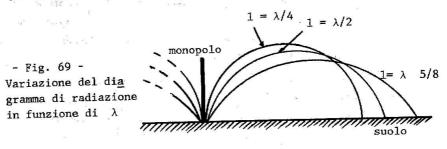
Tale tipo di antenna prende il nome di antenna "Ground Plane" (Piano di terra).



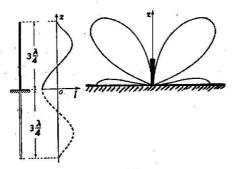
- Fig. 68 - Antenna "ground plane"

Variando l'altezza dell'antenna, a parità di frequenza, la distribuzione di corrente lungo l'antenna e quindi il diagramma di radiazione risulta modificato. Prendendo ad esempio il monopolo con altezze maggiori di $\lambda/4$, il diagramma risulta progressivamente sempre più schiacciato (Fig. 69) cui corrisponde un aumento del guadagno e quindi una maggiore concentrazione del campo nelle regioni prossime al suolo.

Il massimo del guadagno nella direzione orizzontale si ha con un'antenna alta $\,\lambda$ 5/8.



Aumentando ulteriormente l'altezza dell'antenna una parte significativa di potenza viene irradiata in direzioni inclinate rispetto all'orizzonte (Fig. 70).



- Fig. 70 - Distribuzione della corrente e diagramma di radiazione di un'antenna alta $\,\lambda\,\,3/4$

e. - Guadagno dell'antenna trasmittente

(1) Tutte le antenne reali, anche le più semplici, sono caraterizzate da un solido di radiazione che presenta settori in cui la radiazione è massima e settori in cui questa si annulla.

Il radiatore isotropico, che irradia cioè uniformemente in tutte le direzioni (solido di radiazione perfettamente sferico), non esiste nella realtà, ma é un utile elemento di confronto per definire le caratteristiche di radiazione di altre antenne.

Nelle pratiche applicazioni pertanto le antenne devono essere progettate per concentrare la potenza irraggiata solamente nelle direzioni desiderate.

Pertanto la potenza necessaria in trasmissione con un'antenna reale, a parità di segnale utile al ricevitore, è minore di quella che occorrerebbe se il radiatore fosse isotropico.

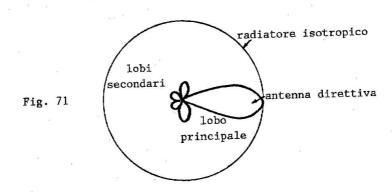
Ovviamente tanto maggiore sarà la concentrazione di potenza nelle direzioni desiderate, tanto maggiore si dirà che è la direttività dell'antenna e tanto maggiore sarà il risparmio della potenza totale emessa.

Questa caratteristica di <u>direttività</u> viene espressa con il guadagno.

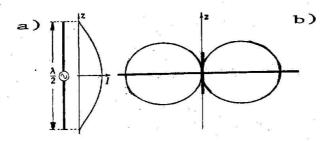
Il guadagno di un'antenna è definito come il rapporto tra:

LA POTENZA IRRADIATA DA UN RADIATORE ISOTROPICO LA POTENZA

IRRADIATA DALL'ANTENNA CONSIDERATA per ottenere la stessa
intensità di campo alla stessa distanza nella direzione di
massima radiazione (fig. 71).



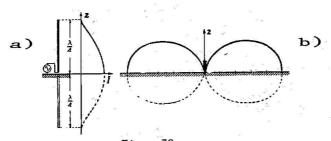
(2) Riprendendo in esame il dipolo a $\lambda/2$ precedentemente descritto si può calcolare che il guadagno di tale antenna (fig. 72) è dato da G = 1.65.



- Fig. 72 - Guadagno del dipolo $\lambda/2$

La direzione di massima radiazione è corrispondente al centro dell'antenna in cui si ha la massima intensità di corrente.

(3) Il diagramma di radiazione del monopolo $\lambda/4$ è invece del tipo rappresentato in fig. 73.

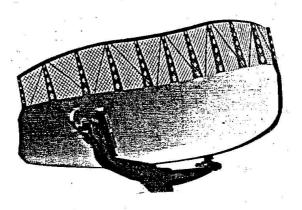


- Fig. 73 - Guadagno del monopolo $\lambda/4$

Il complesso del monopolo e della sua immagine equivale ad un dipolo a $\lambda/2$ pertanto nel semispazio superiore al suolo i due diagrammi di radiazione sono uguali.

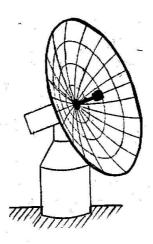
Ovviamente al di sotto della superficie non vi è radiazione, pertanto al disopra del suolo con il monopolo si ottiene la stessa intensità di campo ottenibile con il dipolo con metà della potenza emessa. Pertanto il guadagno del monopolo \acute{e} il doppio del guadagno del dipolo $\lambda/2$ e cioè: G=3.3 .

(4) Con antenne molto direttive, ad esempio quelle a paraboloide utilizzate negli apparati radar e per le telecomunicazioni via satellite, si ottengono elevate concentrazioni di potenza e quindi forti guadagni (Fig. 74) con valori tipici di G dell'ordine delle centinaia e delle migliaia di unità.



- Fig. 74 a -Antenna radar

- Fig. 74 b Antenna per comu
nicazioni via
satellite



(5) Generalmente il guadagno si esprime in d**B**; pertanto dire che un'antenna "guadagna 3 dB" equivale a dire che occorre metà della potenza per ottenere nella direzione di massimo irraggiamento mento la stessa intensità di campo ottenibile con un radiatore isotropico.

Difatti "3 dB" equivale al rapporto tra due potenze una il doppio dell'altra.

f. - Area equivalente dell'antenna ricevente

(1) L'antenna ricevente, in dipendenza delle sue dimensioni fisiche presenta una minore o maggiore capacità di raccogliere energia dall'onda e.m. incidente.

Questa capacità viene indicata come: area effettiva dell'antenna ricevente (A_r) e può essere pensata come l'area del fronte d'onda dalla quale l'antenna intercetta la massima energia da inviare al ricevitore.

(2) In numerose applicazioni l'antenna usata in ricezione è la stessa di quella utilizzata in trasmissione.

Esiste un particolare teorema, denominato di <u>reciprocità</u>,il quale stabilisce che la direttività di un'antenna è la stessa sia in trasmissione quanto in ricezione.

In altre parole se un'antenna in trasmissione concentra la potenza in determinati settori angolari, analogamente in ricezione riceve i segnali provenienti solo da tali settori.

Pertanto dal diagramma di radiazione di un'antenna in trasmissione si determinano anche i settori utili di ricezione e viceversa.

Da quanto sopra detto appare evidente come il guadagno G di un'antenna possa essere utilizzato per esprimere la direttività anche di un'antenna ricevente.

(3) Tra l'area equivalente di un'antenna ricevente ed il guadagno G esiste la seguente relazione:

$$A = \frac{\lambda^2 G}{4 \pi}$$

g. - Rendimento

L'antenna trasmittente trasforma la potenza elettrica fornitagli dal trasmettitore in potenza elettromagnetica che essa irradia nello spazio.

Non tutta la potenza fornita dal trasmettitore viene utilmente impiegata (irradiata) ma una parte viene perduta.

Il rapporto tra la potenza irradiata \boldsymbol{P}_{i} e quella $\boldsymbol{P}_{a}che$ giunge all'antenna $\;$ prende il nome di rendimento $\;\eta\;$.

$$\eta = P_i/P_a$$

Le principali cause di perdite della potenza sono date da:

- (1) La resistenza dei conduttori;
- (2) La dissipazione nella presa di terra (nelle antenne marconiane);
- (3) La dispersione degli isolatori;
- (4) Le perdite per induzione dell'energia RF con conduttori in prossimità dell'antenna (tralicci di sostegno, alberatura delle navi etc.).

Nel caso delle antenne marconiane occorre curare particolarmente la presa di terra, perchè è proprio in questo punto che si ha il massimo valore di corrente.

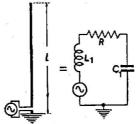
Per migliorare questo collegamento spesso si seppellisce nel suolo una raggiera di fili conduttori, collegando l'antenna al centro di questa.

h. - Selettività dell'antenna

(1) L'antenna come circuito risonante.

Riprendendo in esame quanto detto al precedente paragrafo 7.b.(5), l'antenna può essere vista come un circuito risonante serie.

Prendiamo ad esempio a riferimento l'antenna marconiana $\lambda/4$ di fig. 75 .



- Fig. 75 -

Equivalenza tra un monopolo ed un circuito risonante serie

Questa si può pensare costituita da un circuito risonante serie.

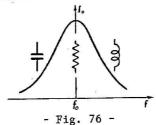
L'ampiezza della corrente alla base dell'antenna è massima alla frequenza:

$$f_0 = c/4 \cdot 1 = 1/2\pi \sqrt{LC}$$

dove: $1 = \lambda_0/4$;

e c = velocità delle onde e.m. nel vuoto.

In tali condizioni l'impedenza reattiva si annulla per cui l'antenna si comporta nei riguardi del trasmettitore come una pura resistenza (fig. 76) nella quale viene totalmente dissipata la potenza.



Andamento della corrente in funzione di "f" in un monopolo

Per le frequenze minori di fo, l'antenna si comporta capacitivamente, mentre per frequenze superiori a $\,f_{\,0}\,$ si comporta induttivamente.

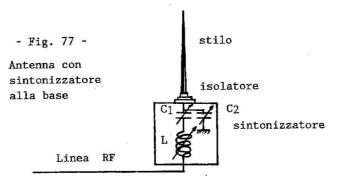
Una volta fissato il valore di "1", per un desiderato valore di centro banda \mathbf{f}_0 la selettività della curva di risonanza dipende dal diametro dell'antenna " d ".

Tanto maggiore sarà " d " tanto più piatta sarà la curva e tanto più larga . sarà la banda di utilizzazione dell'antenna.

(2) Antenne multibanda

Nella maggior parte delle pratiche applicazioni non si può ovviamente disporre di tante antenne quante sono le possibili frequenze che si vogliono trasmettere, in tal caso si ricorre ad antenne cosidette <u>multibanda</u> oppure ad antenne a <u>larga banda</u>.

Un tipico esempio di antenna multibanda è quello costituito da un semplice monopolo a $\lambda/4$ denominato "stilo", e da un circuito accordatore di antenna detto anche <u>sintonizzatore</u> (fig.77).



Questo tipo di antenna trova largo impiego nella banda HF. Prendendo ad esempio tale banda, con uno stilo di 10 m si ha che la frequenza naturale di risonanza a $\lambda/4$ è di 7.5 MHz, a frequenze diverse l'antenna si comporta nei confronti del trasmettitore come un'impedenza capacitiva o induttiva.

Dato che la potenza generata dal trasmettitore deve essere dissipata sull'antenna in forma attiva, questa deve comportarsi come una impedenza resistiva di valore il più possibile prossimo a quello dell'impedenza caratteristica della linea per svariati valori di frequenza.

Per ottenere ciò al piede d'antenna viene inserito un particolare circuito di accoppiamento, il sintonizzatore costituito da condensatori ed induttanze variabili, telecomandati a distanza, tramite i quali è possibile accordare l'antenna in risonanza (annullamento delle reattanze induttive e capacitive) in una larga gamma di frequenze, ad esempio da 2 a 30 MHz.

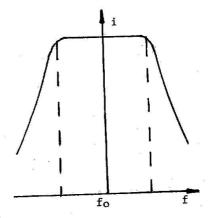
E' opportuno sottolineare l'importanza dell'inserimento del sintonizzatore il più possibile in prossimità dell'antenna, difatti il complesso antenna-sintonizzatore deve risultare adattato con l'impedenza caratteristica della linea all'estremità di questa.

Difatti nel caso di installazioni in punti intermedi della linea, il sintonizzatore adatterebbe l'insieme antenna spezzone di linea a valle del sintonizzatore, ma la giunzione piede d'antenna terminazione linea risulterebbe disadattata.

(3) Antenne a larga banda

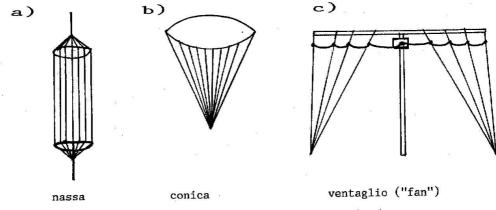
(a) In numerose applicazioni anziche utilizzare un'antenna con curva di risonanza acuta (a banda stretta) con relativo sintonizzatore, si preferisce utilizzare antenne cosidette a larga banda, caratterizzate cioè da una curva di risonanza sufficientemente piatta in un'ampia banda di frequenza nell'intorno di \mathbf{f}_0 (fig.78) .

- Fig. 78 -Curva di risonanza di un'antenna L.B.



(b) Le antenne a larga banda si realizzano aumentando le dimensioni trasversali "d" dell'antenna, una volta fissata la loro lunghezza "l", in relazione alla frequenza di centro banda fo, ovverosia $\lambda/2$ o $\lambda/4$ a seconda che il tipo di antenna che si vuol realizzare sia dipolo o monopolo.

Nelle pratiche realizzazioni le antenne a L.B. hanno tipicamente forme cilindriche (a nassa), coniche, a ventaglio (fig. 79) etc.

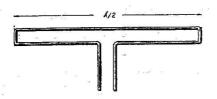


-Fig. 79- Esempi di antenna a larga banda -

Invece di utilizzare elementi radianti a sezione piena, che renderebbero l'antenna L.B. estremamente pesante ed ingombrante, si preferisce di solito realizzare le antenne utilizzando bacchette metalliche o fili.

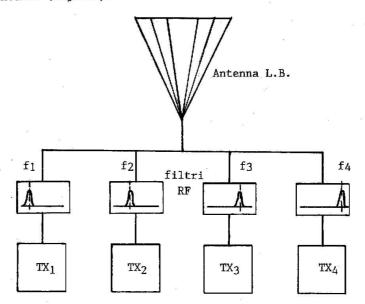
Le distanze tra questi conduttori devono essere comunque ravvicinate, in relazione alla lunghezza d'onda in modo tale, che ai fini elettromagnetici, l'antenna venga vista come un unico conduttore.

(c) Un particolare tipo di antenna a larga banda è il dipolo ripiegato (Fig. 80), molto utilizzato nelle comuni antenne riceventi televisive.



- Fig. 80 -

(d) Le antenne a L.B. si prestano per una utilissima applicazione in luoghi ove è necessario, per ristrettezze di spazio, contenere il numero dei sistemi radianti (ad. es. a bordo di Unità Navali): quella del multi-accoppiamento di più trasmettitori ad una sola antenna (fig. 81).



- Fig. 81 - Multicoupler d'antenna -

Tale accoppiamento si ottiene per mezzo di un apposito dispositivo denominato "Multicoupler".

Il Multicoupler è costituito da tanti filtri selettivi (ad es. 4) quanti sono gli apparati da accoppiare.

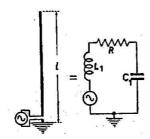
Ciascun filtro viene accordato facendo variare le capacità ed induttanze in modo tale da far passare solo la frequenza relativa al trasmettitore associato (ad es. \mathbf{f}_1) tagliando fuori le altre frequenze.

Pertanto per poter accoppiare più trasmettitori ad una sola antenna è necessario che questi operino tutti su frequenze differenti ed opportunamente distanziate (ad. es. almeno il 5% l'una dell'altra).

Tale dispositivo trova largo impiego a bordo delle Unità Navali per le trasmissioni nella banda HF.

(4) VARIAZIONI VIRTUALI DELLA LUNGHEZZA DELL'ANTENNA

(a) Come abbiamo già visto ai precedenti paragrafi b(5) e h(1), l'antenna si comporta come un circuito risonante serie (fig. 82).



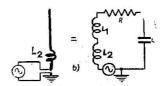
- Fig. 82 -

La frequenza di risonanza di tale circuito è data da

$$f = 1/2\pi \sqrt{L_1 C_1}$$
 (33)

inserendo alla base una induttanza L2 questa risulterà in serie a quella caratteristica dell'antenna $\,L_1\,$ (fig. 83).

- Fig. 83 -Antenna con induttanza . alla base



Pertanto la nuova frequenza di risonanza f_0^1 sarà data da:

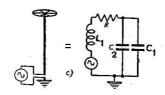
$$f' = 1/2\pi \sqrt{(L_1 + L_2) \cdot C_1}$$

come si può vedere è minore della \mathbf{f}_{0} espressa della relazione(33)

Tale antenna pertanto, operando con una " λ " maggiore si comporta come se fosse un'antenna più lunga.

(b) Un altro metodo per allungare virtualmente l'antenna consiste nel porre alla sommità di essa un complesso di conduttori i quali costituiscono così una capacità aggiuntiva C2 verso terra, che risulta in parallelo rispetto alla capacità C1 propria dell'antenna (fig. 84).

- Fig. 84 -Antenna con capacità in testa



La frequenza di risonanza di tale antenna è data da:

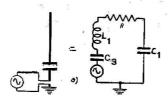
$$f_0'' = 1/2\pi \sqrt{L_1(C_1+C_2)}$$

e pertanto è più bassa di quella rappresentata nella relazione (33).

Sia le antenne con induttanza in serie sia quelle con capacità in testa trovano largo impiego nelle pratiche applicazioni in special modo nelle bande di frequenza MF ed

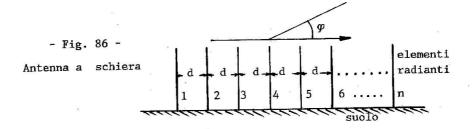
(c) Inserendo invece alla base dell'antenna una capacità C_3 così come rappresentato in fig. 85 si ottime un accorciamento virtuale dell'antenna in quanto C_3 risulta questa volta in serie alla capacità propria dell'antenna C1, per cui il valore di capacità totale risulta diminuito rispetto al caso della antenna di fig. 82 e la frequenza di risonanza risulta quindi più elevata.

- Fig. 85 -Antenna con capacità alla base



i. - Antenne a schiera

(1) Le antenne a schiera sono costituite da un insieme di elementi radianti (radiatori) disposti nello spazio in un certo ordine (fig. 86).



I radiatori possono essere disposti lungo una linea retta, (in tal caso la schiera si dice <u>lineare</u>), oppure su una superficie (schiera <u>planare</u>), oppure in un volume.

(2) La caratteristica peculiare di tali tipi di antenne è quella che disponendo opportunamente i vari radiatori, singolarmente caratterizzati da un diagramma di irradiazione semplice (ad. es. isotropico) si ha la possibilità di generare un diagramma di radiazione complessivo della forma desiderata.

Ciò è possibile in quanto, fissata una determinata frequenza, e quindi una determinata lunghezza d'onda λ , i radiatori possono essere disposti con un passo "d" proporzionale a λ (ad es. d = $\lambda/2$) in modo tale che in determinate direzioni i singoli contributi si sommino mentre in altre si sottraggano.

Ovviamente cambiando la frequenza, a parità di schiera, o cambiando la disposizione dei radiatori, a parità di frequenza, si otterrebbe un differente diagramma di radiazione.

- (4) Prendendo a riferimento una schiera lineare (fig. 86)i parametri che la contraddistingono sono:
 - d passo della schiera,
 - φ angolo di radiazione rispetto alla direzione della schiera,
 - n numero dei radiatori.

Due tipi caratteristici di schiere lineari sono quelle a irradiazione trasversale (g =90°) e quelle ad irradiazione longitudinale (g=0°).

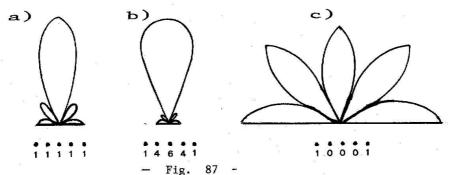
(5) Anche nel diagramma di radiazione di una schiera sono presenti, oltre al lobo principale, i lobi secondari (fig. 87 a).

Una delle tecniche che maggiormente si presta per la riduzione di tali lobi consiste nel far irradiare i vari elementi in maniera non uniforme in accordo ad opportuni criteri di calcolo per la distribuzione dell'energia RF sui differenti radiatori (Fig. 87 b).

Tipicamente facendo irradiare con maggior potenza i radiatori centrali ed in modo decrescente quelli periferici.

Un caso limite opposto di schiera non uniforme è quello nelle quali solo i due radiatori estremi irradiano (schiera "EDGE").

In tal caso si ha una successione di lobi tutti della medesima ampiezza (Fig. 87 c).



Esempi di radiazione di schiera lineare

Come si puo rilevare dalla figura, a parità di numero di elementi e di passo, una maggiore acutezza del lobo principale porta ad un maggior livello relativo dei lobi secondari.

DESIGNAZIONE INTERNAZIONALE DELLE EMISSIONI PER RADIOCOMUNICAZIONI

- PREMESSA

Per designare i vari tipi di radiocomunicazioni è stata emanata, a cura dell'International Telecommunication Union (I.T.U.), una ben precisa normativa con la quale le principali emissioni radio vengono contraddistinte con una sigla.

Fino a tutto il 1981 era in vigore una vecchia classificazione che

a partire dal 1°/1/1982, è stata sostituita da una più recente.

Anche se la precedente classificazione non è più in vigore, tuttavia molti autori continuano ad utilizzarla ed è a questa che si fa riferimento nelle monografie di apparati realizzati prima del 1982. Pertanto, in questo periodo di transizione è opportuno conoscere entrambe le classificazioni.

- VECCHIA CLASSIFICAZIONE

Le emissioni radio sono contraddistinte da una sigla di due o tre
eimboli in base alle seguenti caratteristiche:
(a) tipo di modulazione della portante principale;
(b) tipo di trasmissione;
(a) - caratteristiche supplementari.
Di cognito si riporta l'elenco completo di tali caratteristiche
con a fianco indicati i relativi simboli corrispondenti:

a Tipi di modulazione della portante principale	Simbolo
- Ampiezza - Frequenza (o fase) - Impulsiva	A F P
b <u>Tipi di trasmissione</u>	
 Assenza di ogni modulazione Telegrafia senza l'uso di una frequenza audio 	.0
modulante	1 .
_ Telegrafia con la commutazione ON-OFF di una o più	
frequenze audio modulanti, oppure con la commutazione ON-OFF di una emissione modulata	2
- Telefonia (comprendente anche la filodiffusione)	3
- Teleronia (comprendente anche la littodizia	3 4 5
- a t t (-1- immorini)	5
- Televisione (solo lummagiui) - Telegrafia duplex a quattro frequenze	6
- Telegrafia multicanale voice-frequency	7
- Casi non previsti ai punti precedenti	9 .
c Caratteristiche supplementari	Simbolo
- Banda laterale doppia	(nessuno)
- Banda laterale unica :	
. a portante ridotta	A
. a portante intera	H
. a portante soppressa	J

- Due bande laterali indipendenti		B C
 Banda laterale vestigiale 		
- Modulazione impulsiva :		D
. d'ampiezza		E
in larghezza (o durata)		F
di fase (o di posizione)		· G
. codificata	B	•

Ad esempio una emissione modulata in ampiezza (A), da un segnale telefonico (3), a banda laterale unica con portante soppressa (J) è caratterizzata dalla sigla "A3J", mentre un'emissione modulata in frequenza (F) da un segnale televisivo (5) è caratterizzato dalla sigla "F5".

- NUOVA CLASSIFICAZIONE

Il nuovo metodo per la classificazione delle emissioni è notevolmente più complesso del precedente in quanto permette un'identificazione più precisa di ogni tipo di emissione.

La completa identificazione è data dall'informazione sulla sua

larghezza di banda e sulla sua classe di emissione.

A ciò provvede una sigla di nove caratteri, di cui i primi 4 si riferiscono alla larghezza di banda ed i successivi 5 alla classe di emissione.

La larghezza di banda è espressa da 3 numeri e una lettera. La lettera occupa la posizione di punto decimale ed indica l'unità di grandezza della frequenza. Ad esempio 5,750 KHz diventa 5K75.

Le unità di grandezza sono:

H = Hz (0.001 a 999)

K = KHz (1.00 a 999)

M = MHz (1.00 a 999)

G = GHz (1.00 a 999)

Ogni frequenza deve poter essere caratterizzata da un'unica sigla. Ad esempio 530 KHz viene indicata con 530K e non con M530, in accordo con la tabella prima riportata.

La classe di emissione ha una sigla composta da 5 caratteri di cui i primi tre rappresentano le caratteristiche fondamentali dell'emissione, mentre gli altri due sono relativi alle informazioni supplementari.

Ai punti che seguono si riportano, per ogni carattere, l'elenco dei diversi simboli.

(1).- Il primo carattere è relativo al tipo di modulazione della portante principale. (a) .- portante non modulata

(b).- Modulazione di ampiezza (AM)

	11 ANC	banda laterale doppia	Α
-	- AM,	Danda Taterare deprin	H
375	. AM.	banda laterale unica a portante intera	
	Line	a design a portante ridotta	
-	- AM.	banda laterale unica a portante ridotta	D
		o a livello variabile	 ĸ
		O a livelio valiabile	 т
	ATA	banda laterale unica a portante soppressa	J
	- All,	Danua Ideandonti	В
	_ 'AM _	due bande laterali indipendenti	
-	23229	handa laterale vestigiale	C
- 8	_ AM	handa laterate vestigiate	

p.			
	x	45	
	- 124 -	×	
	- 124		
			100 m
	(c) Modulazione angolare (FM)	10. 12	
	- modulazione di frequenza	F G	
	- modulazione di fase - AM + FM	D	
	(d) Modulazione impulsiva (PM)		
*	- sequenza di impulsi non modulati	P	
	- impulsi modulati in ampiezza	K	
	- impulsi modulati in larghezza o durata	L M	
	 impulsi modulati in posizione o fase PM, con portante modulata angolarmente nel 	P1	
	periodo in cui è presente l'impulso	Q	
3	- combinazioni dei casi precedenti	V	
	- casi finora non previsti ma con portante modulata	W X	
	– casi non trattati prima		
	(2) Il secondo carattere della classe di emissione	è relativo	
all	a natura del segnale che modula la portante principale.		
	(a) non è presente il segnale modulante	0	
	(b) <u>CANALE SINGOLO</u> - <u>segnale contenente un'informazione quantizzata</u>		
	o digitale senza l'uso di una sottoportante		
	modulante	1	
	 come sopra,ma con l'uso di una sottoportante modulante 	2	
	- segnale contenente un informazione analogica	3	
	(c) <u>DUE O PIU' CANALI</u> - segnale contenente un'informazione quantizzata		
	o digitale	7	
E N	- segnale contenente un'informazione analogica	8	
	 un sistema composto da uno o più canali con le caratteristiche viste ai due punti 		
	precedenti	9	
	- casi finora non previsti	X	
	(3) Il terzo carattere della classe di emissione	è relativo	al
ti	po di informazione da trasmettere.		
	- nessuna informazione trasmessa	N .	
	- telegrafia con ricezione audio	A	
	- telegrafia con ricezione automatica	В	
	facsimiletrasmissione dati, telemetria, telecomando	C E	
	- televisione (solo immagini)	F	
	- una combinazione di quanto ai punti precedenti	W	
	- casi finora non previsti	X	

The state of the s	
(4) Il quarto simbolo della classe di emissione	e è relativo a
caratteristiche di varia natura del segnale.	* 8
Codice a due condizioni	
- con elementi diversi per numero e/o durata	Α
- con elementi di uguale numero e durata senza	
correzione d'errore	В
- come al punto precedente ma senza correzione	
d'errore	. C
- codice a quattro condizioni, ogni condizione	
rappresenta un elemento del segnale (di uno	
rappresenta un elemento del begnato (41	D
o più bit) - codice a più condizioni, per il resto come nel	ii.
- codice a più condizioni, per il lesto come men	E
caso precedente - codice a più condizioni (ogni condizione o	
combinazione di condizioni rappresenta un	
	F
carattere)	G
- qualità del suono in diffusione (mono)	H
- come sopra, ma stereo o quadrifonico	J
- qualità di suono commerciale	5
- come prima, ma con inversione di frequenza o	as K :
o band - splitting	
- come sopra, con segnali separati FM per control	L
il livello del segnale demodulato	M M
- in bianco e nero	
- a colori	N W
- una combinazione dei casi precedenti	w X
- casi finora non previsti	Λ
	ol multiplexing
(5) Il quinto simbolo é relativo alla natura d	iei muicipiexing.
- assenza di multiplexing	N
- multiplex a divisione di codice	C
- multiplex a divisione di frequenza	F
- multiplex a divisione di tempo	T
- multiplex a divisione combinata di tempo e di	17
frequenza	W
- altri tipi di multiplexing	X

c.- E' importante sottolineare che i primi tre caratteri della classe di emissione sono quelli obbligatori, e nella maggior parte delle applicazioni militari sono di per se sufficienti per la classificazione del tipo di comunicazione.

I quattro caratteri relativi all'occupazione di banda e i due supplementari della classe di emissione vengono impiegati per una più completa designazione nel caso di emissioni radio di tipo complesso.

Alla pagina seguente si riporta una tabella riassuntiva dei vari tipi di emissione contraddistinti con la vecchia e la nuova designazione internazionale.

		based on old method)		Previous designa- tion	New designs tion
	Type of modulation of main carrier	Type of transmission	Additional characteristics		
	Amplitude modulation	With no modulation Telegraphy Morse telegraphy		A0 A1	NON
		Teletype telegraphy Morse tel., sound-mod.	•	A1 A2	A1B A2A
	-	Teletype telegraphy Morse telegraphy	SSB, suppressed cerrier	A2.1	J2A J2B
		Teletype telegraphy Morse telegraphy	suppressed carrier reduced carrier	A2J A2A A2H	R2A H2A
		Morse telegraphy	full carrier f, autom, reception	A2H	H2B A3E
		Telephony	DSB SSB, reduced carrier	A3 A3A A3H	R3E H3E
			full carrier suppressed carrier Two Independent sidebands	A3J A3B	13E
		Facsimile	SSB, reduced carrier	A4 A4A	A3C R3C
8 G			suppressed carrier	A4J A5	J3C A3F
		Television (video)	Vestigial eldeband SSB, suppressed carrier	A5C A5J	C3F J3F
		Multichannel voice- frequency telegraphy	SSB, reduced carrier suppressed carrier	A7A A7J	R7B J7B
		Cases not covered by the above	-	A9	AXX
		-	DSB, 1 channel, with quantized or		
	T ₂		digital information without mod, subcarrier with mod, subcarrier	A9 A9	A1D A2D
	* 4*	Morse telegraphy	Two Independent sidebands SSB, suppr. carrier	A9B	B9W
	3-	Worse (stoff abil)	1 channel, with quantized or		
			digital information with mod. subcarrier	LQA LQA	J2A J2B
		Teletype telegraphy Telecommand	As above	ABJ	J2D
	Frequency modulation	Telegraphy by fre- quency-shift keying			
	(or phase modulation)	without modulating audio frequency		F1	F1A
		Morse telegraphy Teletype telegraphy	1 · · · · ·	Fi	F1B
		Telegraphy by on-off keying of frequency- modulating			*
		audio frequency Morse telegraphy	*	F2	F2A
8		Teletype telegraphy Telephony and		F2	F2B
		sound broadcasting	- Phase modulation,	F3	F3E
		Facsimile	VHF-UHF radiotelephony 1 channel, with analog inform.	F3 F4	G3E F3C
			with quantized or digital information	F4	F1C
<i>ti</i>		2	without mod, subcarr, with mod, subcarrier	F4 F5	F2C F3F
	as F	Television (video) Four-frequency		F6	F7B
		diplex telegraphy Cases not covered	•	FB	FXX
	3 × × *	by the above Telecommand	1 channel, with quantized or	"	1,700
			digital information without mod, subcarr, with mod, subcarrier	F9 F9	F1D F2D
	Pulsa modulatio	n Pulsed carrier without any modu-			
		lation (e.g. radar) Telegraphy	-	P0 P1D	PON K1A
	¥	taleflights.	Modulation of pulse amplitude pulse duration	P2D P2E	K2A L2A
		Telephony	pulse phase Modulation of pulse amplitude	P2F P3D	M2A K2E
¥I		, seephone 9	pulse duration pulse phase	P3E P3G	V3E
		Cases not covered by the above with	B 81		
		pulse-modulated main cernier	1_	P9	XXX

REGOLE PRATICHE PER L'IMPIEGO DEI DECIBEL (dB)

11 decibel, abbreviazione dB, è un'unità impiegata per esprimere il rapporto tra due quantità di potenza P_1 e P_2 presenti in due punti di un circuito; oppure è anche impiegata per esprimere i rapporti tra due tensioni V_1 e V_2 .

Le definizioni esatte sono le seguenti :

- DECIBEL DI POTENZA , $dB = 10 \log_{10} P_1 / P_2$
- DECIBEL DI TENSIONE, dB = 20 $\log_{10} v_1 / v_2$

Si può dimostrare che i dB di tensione derivano da quelli di potenza in quanto:

nto:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_1^2/R}{V_2^2/R} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2$$
; per cui basta applicare la nota relazione:

$$Log X^2 = 2 Log X$$

E' opportuno però sottolineare che il dB può essere impiegato per esprimere rapporti di tensione solamente quando le tensioni in questione sono misurate su punti con identica impedenza.

Anche se agli effetti matematici e circuitali in taluni casi si potrebbero impiegare indifferentemente i dB di potenza o di tensione, nelle telecomunicazioni generalmente si usano quelli di potenza mentre i dB di tensione trovano larga utilizzazione in elettroacustica.

Molto spesso nella letteratura tecnica l'impiego dei dB viene esteso, per comodità, anche per indicare rapporti di grandezze diverse da quelle di potenza e tensione, purché omogenee.

Pertanto nella esposizione delle regole per calcolare i dB, spesso ipotizzeremo un generico rapporto, purché "numero puro", tra due grandezze $X_1 \stackrel{e}{\sim} X_2$.

b.- Per esprimere i rapporti di due grandezze in dB, nella pratica comune, anzichè ricorrere ad elaborati calcoli logaritmici, è comodo fare uso della seguente tabella semplificativa.

		6 6
Rapporto scalare tra	dB	dB
x ₁ e x ₂	di potenza	di tensione
	B 00	
1 : 1	0	0
2 : 1	3	6
1 : 2	- 3	- 6
*5 * 1	7	14
1 : 5	- 7	- 14
10 : 1	10	20
1 : 10	- 10	- 20
100 : 1	20	40
1 : 100	- 20	- 40
1000 : I	30	60
I :1000	- 30	- 60

Per ricordare mnemonicamente le corrispondenze tra i rapporti scalari ed i valori in dB è sufficiente ricordare le semplici regole sotto riportate.

(1)- I dB tensione, per un uguale valore numerico del rapporto X $_1$ / X , sono sempre il doppio di quelli di potenza, come diretta conseguenza

della loro definizione; per cui in seguito basterà ricordare le corrispondenze dei dB di potenza.

- (2) In un generico rapporto X_1 : X_2 , se X_1 è > X_2 il loro rapporto espresso in dB sarà positivo, mentre se X_2 > X_1 il loro rapporto in dB sarà negativo.
 - Da ciò consegue anche che invertendo un rapporto si cambia il segno al corrispondente valore in dB.
- (3) Il rapporto scalare tra una grandezza X doppia (o la metà) di un'altra X corrisponde a 3 dB di potenza (o - 3 dB).
- (4) Se il rapporto scalare tra due grandezze è una potenza di 10, per trovare il corrispondente in dB di potenza non si deve far altro che prendere l'esponente della potenza di 10 ed aggiungerci "0".

Ad esempio se :

$$X_{1} / X_{2}$$
 = 1 = 10 0 = 0 dB
" = 10 = 10 1 = 10 dB
" = 100 = 10 2 = 20 dB
" = 1000 = 10 3 = 30 dB
" = 0,1 = 10 -1 = -10 dB

etc.

Con le due semplici regole riportate ai precedenti punti (3) e

(4) si può passare con sufficiente approssimazione da qualsiasi

rapporto scalare al corrispondente numero in dB con immediati calcoli

di somme o differenze.

Ad esempio il rapporto citato nella tabella di pag.128di 5 : 1 può essere calcolato come un doppio del doppio più un resto, oppure come la metà della potenza 10 ¹. Ciò sarà comunque esposto più chiaramente nel capitolo seguente.

- d. Nella esecuzione di calcoli nei passaggi tra le grandezze scalari e quelle logaritmiche (e quindi anche quelle dei dB) bisogna tener presente che:
 - <u>il prodotto tra grandezze scalari corrisponde alla somma delle</u> stesse espresse in <u>dB</u>;
 - <u>la divisione tra due grandezze scalari corrisponde alla differenza</u> tra le stesse espresse in dB.

Facciamo qualche esempio:

$$x_1 / x_2 = 200 = 2 \times 100$$
 (scalare), corrisponde a:
 $3 + 20 \text{ dB} = 23 \text{ dB}$

$$x_1 / x_2 = 4000 = 2 \times 2 \times 1000(scalare)$$
, corrisponde a:
 $3 + 3 + 30 \text{ dB} = 36 \text{ dB}$

$$X / X = 5 = ~2 \times 2$$
 (più un certo resto inferiore a 2), corrisponde a :

3 + 3 + 1 (derivante dalla approssimazione
sul resto)

= 7 dB

ma il numero 5 si può anche esprimere come:

10 : 2 (scalare) che corrisponde a :

10 - 3 dB = 7 dB

Come si è visto all'ultimo esempio qualche volta bisogna ricorrele a delle approssimazioni che però nelle applicazioni pratiche si rilevano trascurabili.

Ad esempio dovendo esprimere in dB il rapporto X_1 / X_2 = 46, per semplicità si può approssimarlo a 50 = 5 x 10 che corrisponde a 7 + 10 dB = 17 dB.

Se avessimo effettuato il calcolo adoperando le tavole logaritmiche per il numero " 46 " avremmo ottenuto $X_1/X_2 = 46 = 16.6275$ dB,non molto diverso da 17 dB ricavato per approssimazione.

Ovviamente tale processo di calcolo vale anche all'inverso, cioè quando da un rapporto espresso in dB si vuol passare al corrispondente in scalare.

Ad esempio :

56 dB = 50 + 3 + 3 dB corrispondono a:

$$10^5$$
x 2 x 2 = 400.000 in scalare.

- 27 dB = -30 + 3 dB corrispondono a:

$$1/10 \times 2 = 2/1000 = 1/500$$
 in scalare.

In pratica riassumendo quanto fin qui detto, i rapporti da ricordare nella corrispondenza scalare e logaritmica sono due: quelli inerenti al doppio ed alla metà (3 o -3 dB) e quelli relativi alle potenze di 10. Con un semplice esercizio mentale, senza alcun bisogno di tavole logaritmiche, regoli o calcolatrici, qualsiasi rapporto può essere convertito da scalare a dB, ovviamente accettando in taluni casi una certa approssimazione, riconducendosi a prodotti di due e di potenze di dieci e,viceversa, scomponendo i dB in somme di 3 e di decine.

grandezze. In molte applicazioni tecniche però è più comodo far riferimento al rapporto di una grandezza con un'altra prefissata.

Nella vigente letteratura tecnica la grandezza di potenza maggiormente impiegata nell'ambito delle telecomunicazioni è 1 mW. In tale caso il rapporto tra una potenza generica P, che deve essere espressa in mW, ed 1 mW, espresso in dB, prende il nome di dBm.

Pertanto la definizione di dBm è la seguente :

$$dBm = 10 \log_{10} \frac{P (mW)}{1 mW}$$

Il vantaggio che offre tale metodo é quello di poter esprimere anche valori assoluti di potenza, in quanto questi vengono rapportati ad un valore unitario.

Ad esempio la potenza di 10 W è esprimibile in dBm, difatti : 10 W = 10.000 mW = 10 mW, per cui riferito a 1 mW si ha 40 dBm.

In altre circostanze si può far riferimento alla grandezza unitaria di 1 W ; i dB che ne derivano si chiamano così dBW con la seguente definizione:

$$dBW = 10 Log_{10} P (W)$$

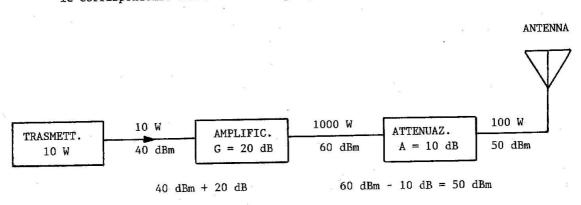
Nel caso dello stesso esempio sopra riportato è immediato ricavare che $10\ \text{W}$ corrispondono a $10\ \text{dBW}$.

Un altro rilevante vantaggio nell'impiego dei dBm (o dBW) consiste nel fatto che vengono notevolmente semplificati i calcoli circuitali o di tratta in quanto, sia i valori delle potenze in gioco, sia le attenuazioni e le amplificazioni (queste ultime due sono rapporti tra le potenze in uscita e quelle in ingresso) vengono espresse come grandezze logaritmiche e come tali sono tra loro sommabili in quanto numeri puri.

Nel corso di tale operazione si tenga però presente che il risultato di una somma tra dBm e dB si esprime in dBm.

Ciò è abbastanza ovvio se si considera l'analogia esistente quando si esegue un prodotto scalare tra una potenza, in W, ed una amplificazione, numero puro, il cui risultato è in W.

A titolo di esempio si esamini la seguente linea in cui sono riportate le corrispondenze tra W e dBm in ogni punto saliente del circuito.



f. - A conclusione di questa breve esposizione è opportuno far presente che, essendo il dB un numero puro, il suo impiego nelle applicazioni tecniche molto spesso viene esteso ai più svariati rapporti di grandezze che nulla hanno a che vedere con le potenze e le tensioni.

A titolo di esempio, nell'ambito delle telecomunicazioni, si possono trovare espressi in dB i rapporti tra bande di frequenza.

Ad esempio sipuò dire che la modulazione di ampiezza comporta un aumento di banda di 3 dB.

BIBLIOGRAFIA

- Elettronica e Radiotecnica Vol. II S. Malatesta Ediz. Mursi
- Elettronica IST Luino Varese.
- Schiere di radiatori M. Boella Dispense Universitarie del Politecnico di Torino.
- J.D. Kraus Antennas Mc. Graw Hill.