

FREDERICK E. TERMAN

RADIOTECNICA
ED
ELETRONICA

VOLUME I

TRADUZIONE

del Dott. MARIO SANTORO

II RISTAMPA

EDIZIONI - C.E.L.I. - BOLOGNA

Via Gandino N. 1

Proprietà letteraria ed artistica riservata

Titolo originale

ELECTRONIC AND RADIO ENGINEERING

McGraw-Hill - New York

Stampato in Italia

Tipografia P Babina e figlio - Bologna

P R E F A Z I O N E

Proseguendo nella pubblicazione della Collana di Radiotecnica, la nostra Casa Editrice pubblica la traduzione italiana della fondamentale opera del Terman « Radiotecnica ed Elettronica » (titolo originale Electronic and Radio Engineering - Mc Graw Hill. Book Co. - NY). Per la profondità e la completezza della trattazione dei vari argomenti, che sostanzialmente coprono tutta la radiotecnica e l'elettronica, l'opera del Terman è ben nota a tutti gli ingegneri e tecnici specializzati nel campo radio, ma lo studio e la consultazione di tale opera era finora limitata alle persone che avevano una grande familiarità con la lingua inglese. Appunto in considerazione di ciò, la ns. Casa Editrice ne pubblica ora la traduzione italiana.

La mole dell'opera (circa 1500 pagine) ci ha consigliato di suddividerla in due volumi, per maggiore maneggevolezza.

Circa il contenuto dell'opera, si può dire che la parte centrale, che ne costituisce il cuore, è dedicata ai fondamenti di radio elettronica ed in essa sono trattati i tubi elettronici, transistori, amplificatori, modulatori, rivelatori e le forme d'onda non lineari. Questa parte è preceduta dai capitoli concernenti gli elementi circuitali e la teoria dei circuiti, ed è seguita da un gruppo di capitoli nei quali sono trattati i sistemi radio e la radiotecnica (antenne, propagazione, televisione e radio navigazione). Numerosi esercizi e problemi (oltre 1250) possono risultare utili ai fini didattici.

La traduzione è stata curata dal dott. Mario Santoro, che ringrazia il Prof. Giuseppe Termini per la collaborazione datagli.

LE EDIZIONI CELI

I N D I C E

Cap. I.	- Gli elementi di un sistema di radiocomunicazioni	pag.	1
	1-1. Onde radio	»	1
	1-2. Radiazione dell'energia elettrica	»	3
	1-3. Generazione e controllo della potenza a radiofrequenza	»	5
	1-4. Ricezione di segnali radio	»	6
	1-5. Natura di un'onda modulata	»	9
	1-6. Il decibel	»	11
Cap. II.	- Elementi circuitali	pag.	14
	2-1. Induttanza	»	14
	2-2. Magnet permanenti	»	21
	2-3. Induttanza mutua e coefficiente di accoppiamento	»	25
	2-4. Effetto pellicolare nelle bobine e nei conduttori a radiofrequenza	»	28
	2-5. Condensatori e dielettrici	»	33
	2-6. Condensatori per applicazioni elettroniche	»	37
	2-7. Bobine per circuiti risonanti	»	42
	2-8. Schermatura di campi magnetici ed elettrostatici	»	50
	Problemi ed esercizi	»	57
Cap. III.	- Proprietà dei circuiti con costanti concentrate	pag.	63
	3-1. Risonanza in serie	»	63
	3-2. Risonanza in parallelo	»	71
	3-3. Circuiti accoppiati induttivamente. Teoria	»	82

VIII INDICE

3-4.	Analisi di alcuni semplici circuiti accoppiati induttivamente	pag. 86
3-5.	Comportamento di sistemi costituiti da un circuito primario e un circuito secondario, entrambi accordati	» 90
3-6.	Altri sistemi di accoppiamento dei circuiti	» 104
3-7.	Teorema di Thévenin	» 107
3-8.	Adattamento di impedenza	» 109
	Problemi ed esercizi	» 111
Cap. IV.	- Linee di trasmissione	pag. 117
4-1.	Relazioni fra le tensioni e le correnti nelle linee di trasmissione a radiofrequenza con onde progressive	» 117
4-2.	Interpretazione delle equazioni delle linee di trasmissione in regime di onde progressive	» 120
4-3.	Costanti delle linee di trasmissione	» 125
4-4.	Esempi di distribuzione di tensione e di corrente sulle linee di trasmissione	» 128
4-5.	Effetto dell'attenuazione sulla distribuzione della tensione e della corrente. Linee a minime perdite	» 136
4-6.	Rapporto di onde stazionarie	» 137
4-7.	Relazioni fra impedenza e fattore di potenza nelle linee di trasmissione	» 140
4-8.	Diagrammi sulle linee di trasmissione. Diagramma di Smith	» 143
4-9.	Misure di impedenza mediante i rapporti di onde stazionarie	» 148
4-10.	Le linee di trasmissione come circuiti risonanti e come elementi di circuiti	» 150
4-11.	Adattamento di impedenza mediante linee di trasmissione	» 153
4-12.	Linee artificiali	» 159
4-13.	Accoppiatori direzionali	» 164

4-14.	Altre particolarità delle linee di trasmissione	pag. 168
	Problemi ed esercizi	» 175
Cap. V.	- Guide d'onda e risuonatori a cavità	pag. 180
5-1.	Guide d'onda. Considerazioni generali	» 180
5-2.	Guida d'onda rettangolari	» 182
5-3.	Modi più alti nelle guide d'onda rettangolari	» 192
5-4.	Rappresentazione fisica della propagazione nelle guide d'onda rettangolari	» 198
5-5.	Guide d'onda circolari	» 204
5-6.	Onda incidente e riflessa. Distribuzione di campo. Rapporto di onde stazionarie nelle guide d'onda	» 206
5-7.	Relazioni di impedenza nelle guide d'onda. Impedenza delle guide d'onda	» 209
5-8.	Comportamento delle guide d'onda a lunghezze d'onda maggiori di quella di taglio	» 217
5-9.	Aspetti vari e proprietà delle guide d'onda. Accoppiamento fra linea coassiale e guida d'onda	» 220
5-10.	Risuonatori a cavità	» 226
5-11.	Accoppiamento dei risuonatori a cavità	» 233
	Problemi ed esercizi	» 235
Cap. VI.	- Proprietà fondamentali dei tubi elettronici	pag. 240
6-1.	Tubi elettronici	» 240
6-2.	Elettroni, ioni e loro movimenti	» 240
6-3.	Emissione termoionica di elettroni	» 245
6-4.	Emissione secondaria	» 250
6-5.	Diodi. Effetti di carica spaziale	» 254
6-6.	Triodi. Azione della griglia controllo	» 259
6-7.	Coefficienti dei triodi	» 264
6-8.	Pentodi	» 269
6-9.	Tubi a griglia schermo (tetrodi)	» 277

X INDICE

6-10. Tubi a fascio	pag. 282
6-11. Coefficienti dei pentodi, dei tubi a griglia schermo e dei tubi a fascio	» 286
6-12. Rappresentazione matematica delle curve caratteristiche dei tubi	» 290
6-13. Gas residui e loro effetto sulle caratteristiche dei tubi elettronici	» 293
6-14. Connessioni speciali per i tubi normali	» 297
6-15. Effetti del tempo di transito nei diodi, nei triodi e nei pentodi	» 298
6-16. Tubi per frequenze altissime	» 308
6-17. Tubi a gas a catodo caldo	» 311
Problemi ed esercizi	» 315
Cap. VII. - Ottica elettronica e tubi a raggi catodici	pag. 323
7-1. Lenti elettroniche. Lenti elettrostatiche	» 323
7-2. Lenti magnetiche	» 329
7-3. Fasci elettronici di uniforme sezione e di alta densità di corrente	» 333
7-4. Caratteristiche fondamentali dei tubi a raggi catodici	» 338
7-5. Considerazioni particolari sui tubi a raggi catodici. Effetti del tempo di transito in caso di deflessione elettrostatica	» 347
Problemi ed esercizi	» 353
Cap. VIII. - Amplificatori di tensione ad audiofrequenza	pag. 357
8-1. Amplificatori a tubi elettronici	» 357
8-2. Distorsione negli amplificatori	» 362
8-3. Circuito equivalente di un amplificatore a tubo elettronico	» 365
8-4. Amplificatori con accoppiamento a resistenza (Detti anche a resistenza-capacità)	» 368
8-5. Amplificatori con accoppiamento a resistenza, aventi insufficienti capacità di fuga sulla griglia schermo e sul catodo	» 375

8-6.	Progetto di amplificatori accoppiati a resistenza	pag. 381
8-7.	Amplificatore di tensione con accoppiamento a trasformatore e trasformatori di entrata	» 389
8-8.	Amplificatori di tensioni continue (ad accoppiamento diretto)	» 397
	Problemi ed esercizi	» 401
Cap. IX.	- Amplificatori di tensione per videofrequenze	pag. 407
9-1.	Amplificatori di tensione per videofrequenze (a larga banda)	» 407
9-2.	Compensazione degli amplificatori video alle frequenze alte	» 413
9-3.	Difetti degli amplificatori video alle frequenze basse	» 427
9-4.	Compensazione delle deficienze degli amplificatori video alle frequenze basse	» 436
9-5.	Amplificatori distribuiti	» 443
	Problemi ed esercizi	» 447
Cap. X.	- Distorsione negli amplificatori - Amplificatori di potenza e sistemi amplificatori	pag. 452
10-1.	Cause della distorsione di ampiezza negli amplificatori	» 452
10-2.	Metodo grafico per determinare la forma d'onda con carico resistivo	» 455
10-3.	Analisi della distorsione di ampiezza e della modulazione incrociata negli amplificatori	» 463
10-4.	Amplificatori con accoppiamento a resistenza e amplificatori video per forti tensioni di uscita	» 472
10-5.	Amplificatori di potenza in Classe A	» 475
10-6.	Trasformatori di uscita per amplificatori in Classe A	» 483

XII INDICE

10-7.	Amplificatori in controfase in Classe A .	pag.	493
10-8.	Amplificatori di potenza in Classe AB e B	»	499
10-9.	Amplificatori ad uscita catodica	»	507
10-10.	Rigenerazione negli amplificatori ad audiofrequenza e a videofrequenza a molti stadi	»	511
10-11.	Regolazione di volume negli amplificatori ad audiofrequenza e a videofrequenza	»	515
10-12.	Ronzio ed effetto microfonico negli amplificatori ad audiofrequenza e a videofrequenza	»	518
	Problemi ed esercizi	»	522
Cap. XI.	- Reazione negativa negli amplificatori	pag.	530
11-1.	Amplificatori a reazione. Considerazioni fondamentali relative alla amplificazione ed alla distorsione	»	530
11-2.	Considerazioni per evitare le oscillazioni negli amplificatori a reazione	»	534
11-3.	Progetto di sistemi a reazione e considerazione sulle oscillazioni	»	537
11-4.	Applicazioni pratiche dei criteri di progetto	»	546
11-5.	Amplificatori a reazione. Considerazioni varie	»	552
11-6.	Servomeccanismi	»	559
	Problemi ed esercizi	»	561
Cap. XII.	- Amplificatori di tensione accordati	pag.	566
12-1.	Amplificatori di tensione accordati	»	566
12-2.	L'amplificatore ad accordo unico	»	567
12-3.	L'amplificatore ad accordo doppio	»	574
12-4.	Aspetti vari degli amplificatori accordati	»	578

12-5.	Amplificatori accordati a larga banda	pag. 583
12-6.	Amplificatori ad accordo unico a larga banda	» 587
12-7.	Amplificatori a larga banda ad accordo doppio	» 591
12-8.	Amplificatori ad accordo sfalsato (stagger-tuned)	» 593
12-9.	Rigenerazione negli amplificatori accordati a molti stadi	» 598
12-10.	Ammetenza di entrata di amplificatori a triodo	» 601
12-11.	Neutralizzazione dell'ammetenza di entrata di amplificatori con tubo elettronico. Sistemi con griglia a massa	» 606
12-12.	Ammetenza di entrata di pentodi, di tubi a fascio e di tubi a griglia schermo	» 612
12-13.	Rumore del circuito e del tubo	» 616
12-14.	Rapporto segnale-rumore e figura di rumore	» 622
	Problemi ed esercizi	» 626

Cap. XIII. - **Amplificatori di potenza accordati** pag. 634

13-1.	Amplificatori accordati in Classe C	» 634
13-2.	Calcolo e progetto di amplificatori in Classe C	» 649
13-3.	Messa a punto pratica degli amplificatori in Classe C	» 658
13-4.	Considerazioni particolari sugli amplificatori in Classe C impieganti tetrodi, tubi a fascio e tubi similari	663
13-5.	Generatori di armoniche (moltiplicatori di frequenza)	» 669
13-6.	Amplificatori lineari (o in Classe B accordati)	» 675
13-7.	Amplificazione lineare di segnali a larga banda	» 678

XIV INDICE

13-3. Considerazioni particolari relative al funzionamento degli amplificatori in Classe C e similari alle UHF	pag. 681
Problemi ed esercizi	» 686

N.B. — L'indice analitico è riportato alla fine del II Volume.

CAPITOLO I.

GLI ELEMENTI DI UN SISTEMA DI RADIOCOMUNICAZIONI

1-1. - Onde radio.

L'irradiazione di energia elettrica nello spazio avviene sotto forma di onde elettromagnetiche. Queste onde, che sono comunemente denominate onde radio, viaggiano con la velocità della luce e consistono di campi elettrici e magnetici perpendicolari fra loro ed ambedue perpendicolari alla direzione di propagazione.

Se questi campi elettrici e magnetici si potessero vedere, l'onda presenterebbe l'aspetto indicato in Fig. 1-1. Metà dell'energia elettrica contenuta nell'onda esiste sotto forma di energia elettrostatica, mentre la rimanente metà è sotto forma di energia elettromagnetica.

Le proprietà che distinguono fra loro le onde radio sono la frequenza, l'intensità, la direzione di propagazione e il piano di polarizzazione. Le onde radio prodotte da una corrente alternata hanno un'intensità che varia conformemente alla variazione istantanea della corrente e pertanto assumono alternativamente valori istantanei positivi e negativi come indica la Fig. 1-1b.

La distanza che il segnale copre per compiere un ciclo completo è uguale alla velocità di propagazione dell'onda divisa per il numero di cicli che avvengono in un secondo ed è chiamata lunghezza d'onda.

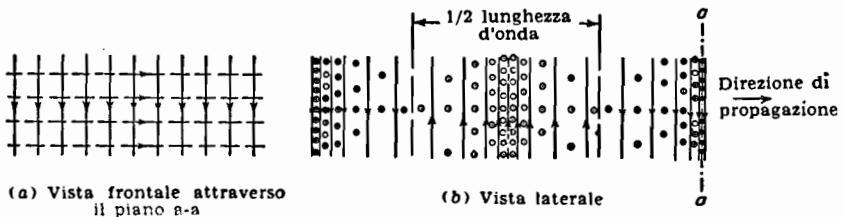


Figura 1-1. - Vista frontale e laterale di un'onda polarizzata verticalmente. Le linee intere rappresentano il flusso elettrico; le linee tratteggiate e i cerchietti indicano il flusso magnetico.

2 RADIOTECNICA ED ELETTRONICA

La relazione fra la lunghezza d'onda λ in metri e la frequenza f in cicli al secondo è

$$\lambda = \frac{300.000.000}{f} \quad (1-1)$$

La quantità 300.000.000 è la velocità della luce, in metri al secondo.

La frequenza normalmente viene espressa in kilohertz (abbreviato: kHz). La frequenza può venire espressa anche in Megahertz (MHz).

Come risulta evidente dall'equazione (1-1), un'onda di frequenza bassa ha una grande lunghezza d'onda, mentre un'onda di frequenza alta ha lunghezza d'onda piccola.

L'intensità di un'onda radio è definita dalla tensione elettrica prodotta nello spazio dal campo elettrico dell'onda. Normalmente viene espressa in microvolt per metro. Siccome la tensione prodotta in qualsiasi punto da un'onda alternata varia sinusoidalmente da un istante all'altro, è consuetudine considerare per intensità dell'onda il valore efficace della sua tensione, che è 0,707 volte l'intensità massima raggiunta durante l'intero ciclo.

L'intensità di un'onda espressa come tensione in microvolt per metro corrisponde anche esattamente alla tensione che il flusso magnetico dell'onda induce in un conduttore di 1 m di lunghezza, quando questo viene attraversato con la velocità della luce.

La minima intensità di campo necessaria per dare una soddisfacente ricezione di un'onda dipende da un certo numero di fattori, quali la frequenza, il tipo di segnale di cui si tratta e il livello di interferenze (disturbi) esistente nella località di ricezione. In particolari condizioni possono essere ricevute onde radio aventi un'intensità inferiore a 0,1 μV per m. Invece in qualche caso per assicurare una ricezione assolutamente soddisfacente e sicura possono essere necessari segnali di oltre 1000 μV per m.

Nella quasi totalità dei casi l'intensità dei segnali sufficiente ad assicurare un collegamento radio è contenuta fra i due valori su indicati.

Per fronte d'onda si intende un piano parallelo alle linee del flusso elettrico e magnetico, fra loro perpendicolari.

L'onda si propaga sempre perpendicolarmente al fronte d'onda. La direzione di propagazione dipende dalla direzione relativa delle linee di flusso elettrico e magnetico. Se si inverte la direzione di uno solo dei flussi elettrico o magnetico, si inverte la direzione di

propagazione; se si invertono entrambe le direzioni dei due flussi la direzione di propagazione rimane inalterata.

La direzione delle linee di flusso elettriche si chiama direzione di polarizzazione dell'onda. Quando le linee di flusso elettrico sono verticali, come è il caso della Fig. 1-1, l'onda è polarizzata verticalmente; quando le linee di flusso elettrico sono orizzontali, mentre le linee di flusso elettromagnetico sono verticali, l'onda è polarizzata orizzontalmente.

Propagazione delle onde radio di differenti frequenze. — Le onde radio che si propagano nello spazio subiscono delle attenuazioni, ossia vengono indebolite man mano che ci si allontana dal trasmettitore. Questo fatto in parte è dovuto al naturale effetto di espansione dell'onda.

Inoltre, può avvenire che parte di energia dell'onda venga assorbita dal suolo o dagli strati ionizzati esistenti oltre l'atmosfera, ossia dalla ionosfera. Infine può avvenire che l'onda venga riflessa o rifratta dalla ionosfera, dall'atmosfera o dal suolo. Le varie situazioni che derivano da questi vari fattori sono alquanto complesse e differiscono fortemente a seconda della frequenza dell'onda radio, secondo come è indicato nella Tabella 1-1. Questa tabella riepiloga il comportamento delle differenti classi di onde radio.

1-2. - Radiazione dell'energia elettrica.

Qualsiasi circuito elettrico percorso da corrente alternata irradia una certa quantità di energia sotto forma di onde elettromagnetiche. L'entità dell'energia irradiata risulta estremamente piccola, a meno che le dimensioni del circuito non siano dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda della corrente che lo attraversa. Così, una linea di alimentazione che trasporti una corrente a 50 Hz e i cui conduttori siano distanti fra loro 6 m praticamente non irradia alcuna energia per il fatto che la lunghezza d'onda corrispondente a 50 Hz è di 6.000 km ed è quindi infinitamente più grande dei 6 m di distanza fra i conduttori. Invece, una bobina che abbia un diametro di 6 m e che sia attraversata da una corrente a 2000 kHz irradianà una considerevole quantità di energia, per il fatto che i 6 m della bobina sono dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda (150 m) della corrente che attraversa la bobina.

Da queste considerazioni risulta evidente che le dimensioni necessarie per un radiatore debbono essere inversamente proporzionali al-

TABELLA 1-1.
CLASSIFICAZIONE DELLE ONDE RADIO

Classe	Campo di frequenza	Campo delle lunghezze d'onda	Caratteristiche di propagazione	Impiego
Frequenze molto basse (VLF)	10-30 kHz	30.000-10.000 m	Attenuazione bassa in qualunque momento del giorno e dell'anno. Sicurezza di collegamento.	Collegamento fra punti fissi a grandi distanze.
Frequenze basse (LF)	30-300 kHz	10.000-1000 m	Propagazione notturna analoga a quella delle VLF ma con sicurezza leggermente minore; assorbimento diurno maggiore che per le VLF.	Servizi fra punti fissi a grandi distanze, servizio marittimo, assistenza alla navigazione.
Frequenze medie (MF)	300-3000 kHz	1000-100 m	Di notte, attenuazione bassa; di giorno attenuazione alta.	Radiodiffusione, comunicazioni marittime, navigazione, telefonia, ecc.
Frequenze alte (HF)	3-30 MHz	100-10 m	La trasmissione a grande distanza avviene unicamente per effetto della ionosfera, per cui l'intensità dei segnali varia fortemente a seconda dell'ora, della stagione e della frequenza.	Collegamenti di qualsiasi tipo a distanze modeste o anche grandi.
Frequenze altissime (VHF)	30-300 MHz	10-1 m	Propagazione sostanzialmente rettilinea analoga a quella delle onde luminose. La ionosfera non influisce sulla propagazione a VHF.	Collegamenti a brevi distanze, televisione, modulazione di frequenza, radar, navigazione aerea.
Frequenze ultraelevate (UHF)	300-3000 MHz	100-10 cm	Idem.	Collegamenti a brevi distanze, radar. Sistemi ripetitori (relé) televisione, ecc.
Frequenze super-elevate (SHF) *	3.000-30.000 MHz	10-1 cm	Idem.	Radar, ripetitori radio, navigazione.

(*) Le frequenze superiori a 2000 MHz spesso vengono chiamate « Microonde ».

la frequenza. Pertanto le onde di frequenza alta possono essere trasmesse mediante radiatori piccoli, mentre per le onde di frequenza bassa sono necessari sistemi di antenna di grandi dimensioni, per poter essere efficacemente irradiate nello spazio.

Ogni radiatore possiede una propria caratteristica di direttività, conseguente al fatto che secondo alcune direzioni esso irradia meglio che secondo altre. Le caratteristiche di direttività delle antenne vengono utilizzate per concentrare la radiazione verso il punto in cui si desidera trasmettere, oppure per favorire la ricezione dei segnali che arrivano secondo una particolare direzione.

1-3. - Generazione e controllo della potenza a radiofrequenza.

In pratica, la potenza a radiofrequenza necessaria per un trasmettitore radio viene sempre ottenuta mediante un oscillatore a tubo elettronico oppure mediante un amplificatore.

I tubi elettronici hanno la proprietà di convertire una potenza di alimentazione a c. c. in energia a c. a. la cui frequenza può assumere praticamente tutti i valori possibili, e cioè dalle frequenze estremamente basse fino a frequenze di 30.000 MHz e oltre. Nella maggioranza dei casi, il rendimento con cui avviene questa trasformazione si aggira intorno al 50 %; in qualche caso può essere anche superiore a questo valore.

Per frequenze fino a circa 1000 MHz la potenza che può essere generata con continuità dai tubi elettronici risulta piuttosto notevole (dell'ordine dei kilowatt).

Modulazione. — Quando si deve trasmettere per via radio un'informazione, occorre variare una delle caratteristiche dell'onda radio conformemente con l'informazione che si deve trasmettere.

La modulazione d'ampiezza consiste nel modificare l'ampiezza dell'onda trasmessa. In radiotelegrafia ciò equivale ad interrompere il funzionamento del trasmettitore, in corrispondenza con i punti e le linee del codice telegrafico, come illustra la Fig. 1-2 *b*.

In radiotelegrafia con modulazione d'ampiezza, l'ampiezza dell'onda a radiofrequenza viene modificata conformemente alla forma di onda del suono da trasmettere, alla maniera indicata in Fig. 1-2 *e*. Allo stesso modo, nelle trasmissioni televisive, l'ampiezza istantanea dell'onda trasmessa è proporzionale all'intensità della luce di quella parte dell'immagine che in quell'istante viene trasmessa.

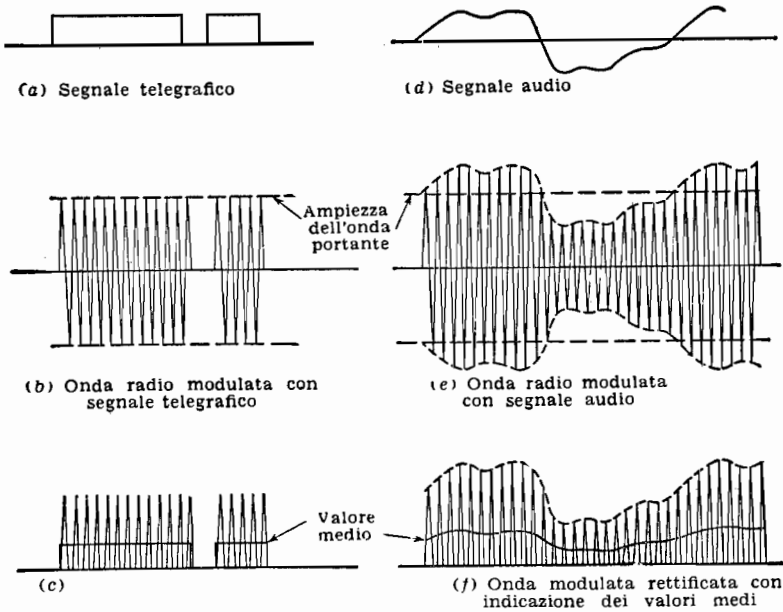


Figura 1-2. - Rappresentazione schematica del modo con cui un segnale può venir trasmesso modulando un'onda radio e del modo con cui in ricezione il segnale di modulazione originario possa essere ricavato per rettificazione dell'onda modulata. Per chiarezza, l'onda radio è stata rappresentata come se avesse una frequenza molto minore di quella che effettivamente ha in pratica.

Un'informazione può essere trasmessa in maniera differente dalla variazione di ampiezza di un'onda. Per esempio, si può mantenere costante l'ampiezza del segnale trasmesso mentre se ne varia la frequenza conformemente all'informazione da trasmettere. Si realizza così la *modulazione di frequenza*.

Nella Fig. 1-3 *b* è rappresentata un'onda modulata in frequenza. Essa può essere agevolmente confrontata con l'onda modulata in ampiezza, illustrata in Fig. 1-3 *a*.

La modulazione di frequenza viene ampiamente usata nei sistemi di comunicazione a VHF (frequenze altissime).

1-4. - Ricezione di segnali radio.

Nella ricezione dei segnali radio è anzitutto necessario captare la energia contenuta nelle onde radio che passano attraverso il punto in

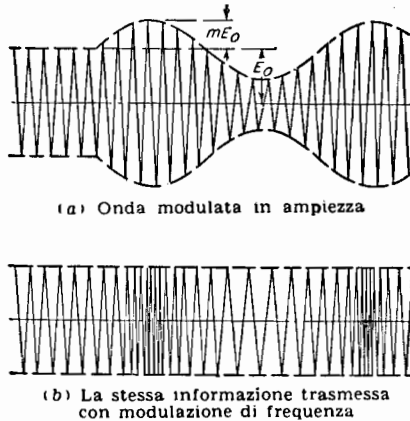


Figura 1-3. - Caratteristiche di un'onda modulata in ampiezza e in frequenza. In entrambi i casi si è supposto un segnale di modulazione sinusoidale. Per chiarezza l'onda radio è stata rappresentata come se avesse una frequenza molto minore di quella che effettivamente ha in pratica.

cui è installata l'antenna del ricevitore. Qualsiasi antenna che sia in grado di irradiare energia elettrica, è anche in grado di captare energia da un'onda radio in arrivo. Ciò avviene per effetto del flusso elettromagnetico dell'onda che, tagliato dal conduttore dell'antenna, induce in quest'ultima una tensione variabile nel tempo e che corrisponde esattamente alla corrente che circolava nell'antenna trasmittente all'istante in cui l'onda stessa è stata trasmessa. Questa tensione indotta associata con la corrente che la genera, rappresenta l'energia che viene captata sull'onda in arrivo.

Siccome qualsiasi onda che arriva sull'antenna ricevente induce su questa una propria tensione, è necessario che l'apparato ricevente sia in grado di separare il segnale che si desidera ricevere dai segnali indesiderati, dato che anche questi inducono tensioni nell'antenna. Questa separazione viene compiuta basandosi sulla differenza di frequenza fra i segnali emessi dalle varie stazioni trasmittenti, impiegando circuiti risonanti che siano in grado di selezionare tra loro i vari segnali, estraendo fra essi solo il segnale che interessa ricevere e che ha una propria frequenza.

L'attitudine a discriminare fra loro le onde radio di differenti frequenze è denominata *selettività* e il procedimento con cui i circuiti vengono regolati in modo da accordarsi sulla frequenza del segnale desiderato si chiama *sintonia* o *accordo*.

Sebbene qualche volta sia stato possibile ricevere in maniera intelligibile segnali emessi da trasmettitori radio situati a migliaia di chilometri di distanza impiegando unicamente l'energia captata dall'antenna ricevente, si ottengono ricezioni molto più soddisfacenti se si amplifica il segnale ricevuto. Questa amplificazione può essere eseguita sulle correnti a radiofrequenza prima di rivelarle, e allora si dirà che si attua l'amplificazione a radiofrequenza. L'amplificazione può essere eseguita sulle correnti rettificata che si hanno dopo la rivelazione; in questo caso l'amplificazione viene denominata ad audiofrequenza.

Mediante l'amplificazione si rende possibile ricevere soddisfacentemente segnali che, essendo di un'intensità molto debole, risulterebbero altrimenti praticamente inudibili.

Il sistema più soddisfacente che finora si è trovato per amplificare un segnale radio consiste nell'impiego di un tubo elettronico o di un transistor. Prima della scoperta dei tubi elettronici, la ricezione radio era possibile soltanto quando il segnale captato dall'antenna era sufficientemente intenso.

Rivelazione. — Il processo secondo cui viene ricavata l'informazione contenuta nel segnale a radiofrequenza trasmesso e che è contenuto nella corrente a radiofrequenza modulata che circola nel ricevitore, è denominato *rivelazione* e qualche volta *demodulazione*. Nel caso di segnali modulati in ampiezza, la rivelazione viene eseguita rettificando le correnti a radiofrequenza, così da ottenere una corrente la quale vari conformemente alla modulazione dell'onda ricevuta. Così, rettificando l'onda modulata rappresentata in Fig. 1-2 *e*, la corrente che si ottiene, illustrata in Fig. 1-2 *f*, assume un valore medio il quale varia conformemente con l'ampiezza del segnale originario.

Nella trasmissione radio di segnali telegrafici, la corrente rettificata riproduce i punti e le linee del codice telegrafico, come risulta dalla Fig. 1-2 *c*, e tale corrente può venire utilizzata per azionare un cicalino telegrafico o un registratore. Quando si desidera ricevere direttamente in cuffia un segnale telegrafico, diviene necessario fare in modo che i punti e le linee corrispondano a tratti di un segnale ad audiofrequenza udibile, ricavando così una nota che possa essere sentita, poichè altrimenti la cuffia darebbe solo una successione di colpi che non consentirebbero di decifrare il segnale trasmesso.

La rivelazione di un segnale modulato in frequenza avviene in due tempi. Dapprima il segnale viene applicato ad un circuito la cui risposta dipende dalla frequenza. Il segnale di uscita di questo circuito

risulta così modulato in ampiezza, mentre il segnale d'entrata aveva ampiezza costante e frequenza variabile. In altri termini, si fa in modo che l'ampiezza del segnale di uscita di questo circuito corrisponda alle variazioni della frequenza del segnale trasmesso. Il segnale modulato in ampiezza così ottenuto viene poi rivelato.

1-5. - Natura di un'onda modulata.

Un'onda puramente sinusoidale non contiene alcuna informazione, dato che essa si ripete invariata nel tempo. Quando un'onda viene modulata, tanto se in frequenza come se in ampiezza, essa non è più un'onda sinusoidale semplice, ma invece risulta costituita da un insieme di molte onde, di frequenze alquanto differenti l'una dall'altra, e che si sovrappongono fra loro.

La natura effettiva di un'onda modulata può essere ricavata scrivendo l'equazione dell'onda e analizzando tale equazione.

Nel caso di modulazione sinusoidale in ampiezza (come quella illustrata dalla Fig. 1-3 a), l'ampiezza dell'oscillazione a radiofrequenza è espressa da

$$E = E_0 + mE_0 \text{ sen } 2\pi f_s t$$

nella quale E_0 rappresenta il valore medio, f_s la frequenza secondo la quale varia l'ampiezza, e m il rapporto fra la variazione di ampiezza rispetto all'ampiezza media e l'ampiezza media stessa. La quantità m viene chiamata *grado (o profondità) di modulazione*.

L'equazione dell'onda modulata in ampiezza può essere scritta come segue

$$e = E_0(1 + m \text{ sen } 2\pi f_s t) \text{ sen } 2\pi f t \quad (1-2)$$

nella quale f è la frequenza dell'oscillazione radio. Sviluppando tale equazione, si ottiene

$$e = E_0 \text{ sen } 2\pi f t + mE_0 \text{ sen } 2\pi f_s t \text{ sen } 2\pi f t$$

Sviluppando l'ultimo termine sotto forma di somma e differenza angolare, secondo comuni formule trigonometriche, l'equazione di un'onda modulata in ampiezza con modulazione sinusoidale assume la forma

$$e = E_0 \text{ sen } 2\pi f t + \frac{mE_0}{2} \cos 2\pi(f - f_s)t - \frac{mE_0}{2} \cos 2\pi(f + f_s)t \quad (1-3)$$

L'equazione (1-3) dimostra che un'onda modulata in ampiezza con modulazione sinusoidale consiste di tre componenti. Il primo di essi,

rappresentato dal termine $E_0 \sin 2\pi ft$, è denominato *onda portante*. La sua ampiezza è indipendente dalla presenza o meno della modulazione ed è uguale all'ampiezza media dell'onda.

Gli altri due componenti sono uguali, per quanto concerne l'ampiezza. Però la frequenza di uno di essi è minore di quella dell'onda portante, per un valore uguale alla frequenza di modulazione. La frequenza dell'altro è maggiore della frequenza dell'onda portante, di un valore anch'esso uguale alla frequenza di modulazione. Questi due componenti, chiamati *frequenze (o bande) laterali*, sono quelli che contengono l'informazione trasmessa con l'onda modulata.

La differenza di frequenza fra ognuna delle frequenze laterali e la frequenza dell'onda portante dipende dalla frequenza di modulazione. L'ampiezza relativa delle componenti di banda laterale dipende dall'entità della modulazione che viene impressa all'onda, ossia dal grado di modulazione.

Quando il segnale di modulazione ha una forma più complessa di una semplice senoide, si ottengono altre componenti di banda laterale. Così, se ad es. l'onda di un trasmettitore radiofonico deve venire modulata in ampiezza mediante un segnale ad audiofrequenza complesso, contenente le frequenze di 1000 Hz e 1500 Hz, l'onda modulata che si ottiene conterrà una coppia di componenti di banda laterale a 1000 Hz e un'altra coppia a 1500 Hz.

L'analisi delle onde modulate in frequenza è alquanto più complicata rispetto a quelle modulate in ampiezza, ma conduce sostanzialmente a risultati analoghi. La principale differenza è che l'onda modulata in frequenza non solo contiene le stesse frequenze laterali della corrispondente onda modulata in ampiezza, ma contiene anche frequenze laterali di ordine più alto. In altri termini, se la frequenza di un'onda viene fatta variare al ritmo di 1000 variazioni al secondo, la risultante onda modulata conterrà non solo una coppia di frequenze laterali a 1000 Hz, ma anche una coppia a 2000 Hz e probabilmente anche altre coppie a 3000 Hz, ecc.

Le ampiezze di queste varie coppie di frequenze laterali dipendono dall'entità e dalla frequenza delle variazioni di frequenza.

Significato delle bande laterali. — L'onda portante e i segnali di banda laterale non sono una semplice espressione matematica, ma esistono realmente e ciò può essere messo in evidenza separando l'una dall'altra le varie componenti di un'onda modulata, mediante opportuni filtri.

Si può considerare che le frequenze di banda laterale vengono generate in seguito all'alterazione dell'onda. Infatti esse sono presenti soltanto quando un'onda viene variata in ampiezza o in frequenza e le loro frequenze e ampiezze dipendono dalle caratteristiche del segnale di modulazione.

È evidente che per trasmettere un'informazione è necessario impiegare una banda di frequenza e non una sola frequenza. Le parole o la musica che normalmente vengono trasmesse e riprodotte nelle radiocomunicazioni in fonia comprendono componenti la cui frequenza è contenuta fra circa 100 Hz e 5000 Hz. Quando con queste componenti si esegue la modulazione di un'onda portante, si ottiene che la larghezza di banda totale coperta dalle bande laterali raggiunge i 10.000 Hz. Se questa banda di frequenze non viene trasmessa in maniera uniforme o se una parte di essa viene attenuata dai circuiti del trasmettitore o del ricevitore attraverso i quali l'onda modulata vien fatta passare, avviene che alcune componenti di banda laterale vengono attenuate o eliminate e pertanto non possono venir riprodotte con livello giusto. In seguito a ciò si ha una diminuzione del grado di qualità della ricezione.

La larghezza di banda necessaria per ricevere segnali telegrafici risulta relativamente stretta per il fatto che l'ampiezza del segnale a radiofrequenza viene fatta variare soltanto poche volte al secondo. Malgrado ciò, è necessaria una certa larghezza di banda in trasmissione e in ricezione. Se una parte dei componenti di banda laterale dei segnali telegrafici non viene trasmessa, i punti e le linee che si ottengono in ricezione tendono ad arrotondarsi e a confondersi fra loro, con conseguente perdita di intellegibilità.

1.6. - Il decibel.

Il decibel (abbreviato db) è un'unità logaritmica che viene usata nel campo delle comunicazioni per esprimere rapporti di potenza.

Se sono P_1 e P_2 le potenze da confrontare fra loro, si ha

$$\text{Decibel} = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} \quad (1.4)$$

Il segno che accompagna il numero di decibel indica se si ha aumento o diminuzione di potenza: se il segno è positivo, vuol dire che P_2 è maggiore di P_1 ; se è negativo vuol dire che P_2 è minore di P_1 .

TABELLA 1-2.

a) RAPPORTI DI POTENZA, TENSIONE E CORRENTE
CORRISPONDENTI AI VALORI IN DECIBEL.

db	Rapporto di correnti o tensioni		Rapporto di potenza		db	Rapporto di correnti o tensioni		Rapporto di potenza	
	Guadagno	Perdita	Guadagno	Perdita		Guadagno	Perdita	Guadagno	Perdita
0.0	1.00	1.000	1.00	1.000	10	3.16	0.316	10.00	0.100
0.2	1.02	0.977	1.05	0.955	12	3.98	0.251	15.8	0.063
0.4	1.05		1.10	0.912	14	5.01	0.200	25.1	0.040
0.6	1.07	0.933	1.15	0.871	16	6.31	0.158	39.8	0.025
0.8	1.10	0.912	1.20	0.832	18	7.94	0.126	63.1	0.016
1.0	1.12	0.891	1.26	0.794	20	10.00	0.100	100.0	0.010
1.5	1.19	0.841	1.41	0.708	25	17.8	0.056	3.16×10^2	3.16×10^{-3}
2.0	1.26	0.794	1.58	0.631	30	31.6	0.032	10^3	10^{-3}
2.5	1.33	0.750	1.78	0.562	35	56.2	0.018	3.16×10^3	3.16×10^{-4}
3.0	1.41	0.708	2.00	0.501	40	100.0	0.010	10^4	10^{-4}
3.5	1.50	0.668	2.24	0.477	45	177.8	0.006	3.16×10^4	3.16×10^{-5}
4.0	1.58	0.631	2.51	0.398	50	316	0.003	10^5	10^{-5}
4.5	1.68	0.596	2.82	0.355	60	1.000	0.001	10^6	10^{-6}
5	1.78	0.562	3.16	0.316	70	3.160	0.0003	10^7	10^{-7}
6	2.00	0.501	3.98	0.251	80	10.000	0.0001	10^8	10^{-8}
7	2.24	0.477	5.01	0.200	90	31.600	0.00003	10^9	10^{-9}
8	2.51	0.398	6.31	0.158	100	100.000	0.00001	10^{10}	10^{-10}
9	2.82	0.355	7.94	0.126	120	1.000.000	0.000001	10^{12}	10^{-12}

b) NUMERO DI DECIBEL CORRISPONDENTE AI VARI RAPPORTI
DI POTENZA, TENSIONE E CORRENTE.

Rapporto	Numero di db		Rapporto	Numero di db		Rapporto	Numero di db	
	Potenza	Tensione o corrente		Potenza	Tensione o corrente		Potenza	Tensione o corrente
10^{-6}	-60.00	-120.00	1.2	0.79	1.58	10	10.00	20.00
10^{-5}	-50.00	-100.00	1.4	1.46	2.92	12	10.79	21.58
10^{-4}	-40.00	-80.00	1.6	2.04	4.08	14	11.46	22.92
0.001	-30.00	-60.00	1.8	2.55	5.10	16	12.04	24.08
0.003	-25.23	-50.46	2.0	3.01	6.02	18	12.55	25.10
0.005	-23.01	-46.02	2.5	3.98	7.96	20	13.01	26.02
0.01	-20.00	-40.00	3.0	4.77	9.54	25	13.98	27.96
0.03	-15.23	-30.46	3.5	5.44	10.88	30	14.77	29.54
0.05	-13.01	-26.02	4.0	6.02	12.04	40	16.02	
0.10	-10.00	-20.00	4.5	6.53	13.06	50	16.99	33.98
0.15	-8.24	-16.48	5.0	6.99	13.98	60	17.78	35.56
0.20	-6.99	-13.98	5.5	7.40	14.81	80	19.03	38.06
0.30	-5.23	-10.46	6.0	7.78	15.56	100	20.00	40.00
0.40	-3.98	-7.96	6.5	8.13	16.26	10^3	30.00	60.00
0.50	-3.01	-6.02	7.0	8.45	16.90	10^4	40.00	80.00
0.60	-2.22	-4.44	7.5	8.75	17.50	10^5	50.00	100.00
0.80	-0.97	-1.94	8.0	9.03	18.06	10^6	60.00	120.00
1.00	0.00	0.00	9.0	9.54	19.08	10^7	70.00	140.00

Il decibel non ha alcun altro significato, oltre a quello derivante dalla equazione (1-4). Quando un'amplificazione viene espressa in decibel, significa semplicemente che per effetto della amplificazione si ottiene un aumento della potenza di uscita, corrispondente al numero dei decibel indicati.

Siccome, in determinate condizioni, la potenza risulta proporzionale al quadrato della tensione E (o della corrente I o del campo B ecc.), nelle stesse condizioni si ha

$$\text{Decibel} = 20 \log_{10} \frac{E_2}{E_1} = 20 \log_{10} \frac{I_2}{I_1} = 20 \log_{10} \frac{B_2}{B_1}, \text{ ecc} \quad (1-5)$$

Queste relazioni debbono essere impiegate con attenzione poichè, per essere valide, occorre che la resistenza associata con E_2 (o I_2 o B_2) sia uguale a quella associata con E_1 (o I_1 o B_1).

La praticità dell'impiego dei decibel deriva dalla natura stessa dei logaritmi. Mediante l'impiego dei decibel risulta possibile esprimere con numeri non molto grandi gli enormi salti di potenza che si possono avere nelle radiocomunicazioni, pur rimanendo la possibilità di esprimere convenientemente piccoli rapporti. Ad esempio, mentre 1 db equivale ad un rapporto di potenza di circa 5:4, 60 db rappresenta un rapporto di potenza di 1.000.000:1.

Il carattere logaritmico dei decibel rende anche possibile esprimere i rapporti fra le potenze di uscita e di entrata di un circuito complicato sotto forma di somma dei decibel corrispondenti ai rapporti fra le potenze di uscita e di entrata delle varie parti o stadi del circuito, disposti in cascata.

La Tabella 1-2 fornisce un sommario dei valori dei decibel.