

Università degli Studi di Salerno
Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali
Corso di laurea in Informatica Specialistica

Trasmissione di segnali analogici

Relazione di Fisica ed Applicazioni per le Tecnologie Informatiche

Bernardino Frola

25 febbraio 2008

Indice

1	Introduzione	2
1.1	Panoramica	2
1.2	Struttura del documento	3
1.3	Riferimenti al corso universitario <i>FATI</i>	3
1.4	Strumenti utilizzati	3
2	Introduzione alla trasmissione di segnali	3
2.1	Principio fisico - induzione	3
2.2	Onde radio	5
2.3	Antenna	6
2.4	Segnali modulati	6
2.4.1	Processo di modulazione	6
2.4.2	Portante	7
2.4.3	Modulazione di ampiezza	7
2.4.4	Modulazione angolare	10
2.5	Accesso multiplo	11
3	Ricevitore radio a rilevazione diretta	14
3.1	La radio più semplice	14
3.2	Qualcosa di più complesso	15
3.3	Funzionamento	16
3.3.1	Tuning	18
3.3.2	Rilevazione	18
4	Ricevitore radio a supereterodina	19
4.1	Problemi di affollamento	19
4.2	Principio supereterodino	19
4.2.1	Mixing di onde	20

4.2.2	Input al mixer	20
4.2.3	Frequenze intermedie	20
4.2.4	Frequenze immagine	21
4.3	Composizione	22
4.4	Funzionamento	24
4.4.1	Tuning	24
4.4.2	Rilevazione	24
A	Bande laterali	24
A.1	Banda laterale doppia (BLD)	24
A.1.1	Portante soppressa	25
A.1.2	Portante intera	25
A.1.3	Portante parzialmente soppressa	25
A.2	Banda laterale unica (BLU)	25
B	Efficienza della trasmissione in AM	25
B.1	Potenza del segnale	25
B.2	Rumore e SNR	26
B.3	Confronto AM-FM	28
C	Script Matlab utilizzati	28
C.1	Modulation.m	28
C.2	AM.m	29
C.3	Demodulation.m	29

1 Introduzione

1.1 Panoramica

L'obbiettivo di questa relazione è fornire una descrizione patrica della trasmissione dei segnali analogici via etere, cercando di sottolineare gli aspetti fisici degli argomenti trattati.

Intento non secondo del documento è quello di mantenere un filo diretto tra quello che si discute a livello teorico e quello che è l'aspetto concreto della materia sotto esame. A tal proposito si è scelto di descrivere il tema proposto seguendo come filo conduttore la descrizione del più blasonato strumento di trasferimento di segnali analogici, ovvero la radio.

Potrebbe sembrare sorprendente come, oggi giorno, il funzionamento della radio sia tanto scontatato quanto ignorato, pur trattandosi di un sistema basato su concetti alla base di applicazioni decisamente più complesse, entrate a far parte della vita quotidiana di un elevatissimo numero di persone, come ad esempio, i cellulari.

1.2 Struttura del documento

La relazione segue un percorso che aumenta gradualmente la complessità del discorso, man mano che si va avanti, seppur mantenendo un livello di semplicità elevato.

Come detto alla base del lavoro c'è lo studio del funzionamento della radio. Si parte quindi con l'introduzione dei concetti ed i principi fisici che ne sono alla base, presenti nella sezione 2.

La sezione successiva, la 3, affronta le problematiche basilari per l'apprensione del funzionamento di un ricevitore radio AM a rilevazione diretta.

Sulla base della sezione precedente, la 4 discute una importante evoluzione della radio, ed in particolare la ricezione a supereterodina.

In coda al documento sono state inserite tre appendici. La prima (appendice A) approfondisce il discorso accennato durante la discussione sulla modulazione affrontato in 4.2.1

L'appendice B si occupa invece di aggiungere alcune considerazioni riguardo la modulazione in AM, come la potenza e la qualità di trasmissione.

L'ultima, l'appendice C descrive gli script Matlab realizzati ed utilizzati per la creazione dei grafici.

1.3 Riferimenti al corso universitario *FATI*

La relazione è stata realizzata come integrazione alla prova di esame per il corso di *Fisica ed Applicazioni per le Tecnologie Informatiche*. Durante il corso sono stati studiati argomenti che potrebbero essere ritenuti *esotici* per uno studente informatico ma che a mio avviso sono necessari alla comprensione di nozioni ampliamene trattati in altri corsi di studio.

Per quanto riguarda i contenuti, la relazione si allaccia agli argomenti trattati durante il corso riguardanti la propagazione delle onde elettromagnetiche, e tutto ciò da cui dipende, come ad esempio impedenza e circuiti lineari.

1.4 Strumenti utilizzati

La relazione è stata scritta mediante l'utilizzo del sistema Latex. I grafici sono stati realizzati con Mathworks Matlab. I diagrammi ed i circuiti sono stati disegnati con Microsoft Visio.

2 Introduzione alla trasmissione di segnali

2.1 Principio fisico - induzione

Iniziamo il discorso della trasmissione dei segnali analogici cercando di capire come avviene il trasferimento di energia da un punto ad un altro che carat-

terizza una trasmissione basata sulla propagazione delle onde elettromagnetiche.

Proviamo ad eseguire il seguente esperimento: prendiamo un filo in grado di condurre della corrente elettrica e colleghiamo i suoi capi alle due estremità di una batteria, proprio come illustrato in figura 1. Chiudendo il circuito abbiamo il seguente risultato: la batteria si scarica velocemente e forse si brucia anche, dato l'aumento di calore della stessa. Questo appena citato è solo uno degli effetti visibili dell'esperimento, dicendo questo si lascia presagire che sia accaduto qualcosa di non visibile nel corso della prova. In effetti qualcosa è accaduto. Il cavo utilizzato è stato attraversato da una corrente elettrica (figura 1b), gli elettroni si sono mossi al suo interno ed è stato creato un campo elettrico attorno ad esso, proprio come Maxwell ha formalizzato nella quarta delle sue famose quattro equazioni.

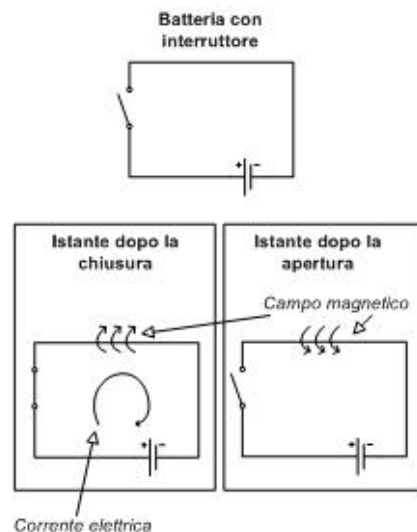


Figura 1: Campo magnetico generato dalla corrente che attraversa un cavo conduttore.

Fatto questo proviamo qualcosa di più rilevante. Procuriamoci un voltmetro e colleghiamo ai suoi capi un altro cavo e posizioniamo ora il tutto vicino al minicircuito dell'esperimento precedente (figura 2). Ricolleghiamo i due poli della pila come fatto prima e osserviamo il voltmetro: noteremo un piccolo balzo della lancetta. Lo stesso accade quando si stacca la pila dal primo circuito. Questa volta a spiegarci l'avvenimento ci corre in aiuto la terza equazione di Maxwell che dice, in parole povere, che un all'interno di un circuito in presenza di una *variazione* del campo magnetico circola una corrente elettrica.

Riepilogando:

- Collegando i capi della pila con il cavo si è generata una corrente

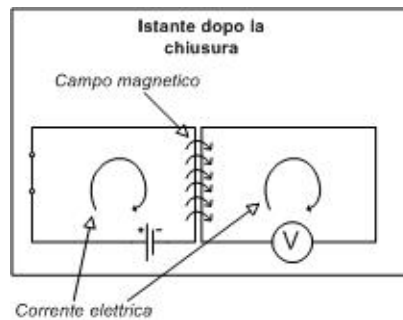


Figura 2: Corrente generata dal campo magnetico

elettrica all'interno di quest'ultimo.

- Si è avuta una variazione del campo magnetico dovuta alla variazione della differenza di potenziale.
- La variazione del campo magnetico ha *indotto* una corrente nel secondo circuito.

Abbiamo quindi trasmesso un impulso dal circuito con la pila, che funge da *trasmettitore*, al secondo circuito, che è dunque il *ricevitore*.

A questo punto affinché si abbia una variazione costante del campo magnetico basta avere una variazione costante della corrente che circola all'interno del trasmettitore. A tal proposito basta utilizzare un oscillatore che produca un segnale sinusoidale. La corrente che circola cambia in ogni istante e di conseguenza cambia il campo magnetico. In questo modo, lato ricevitore, riusciremo a rilevare esattamente il segnale presente nel trasmettitore.

2.2 Onde radio

Fino ad ora abbiamo parlato di trasmettitore e ricevitore vicini tra loro, in modo tale da far percepire al ricevitore il campo magnetico generato dal trasmettitore.

Proseguendo nella composizione del trasmettitore visto prima, tramite l'ausilio di un amplificatore e di un pezzo metallico che funga da antenna possiamo fare in modo di irradiare il segnale a lunghe distanze. L'irradiazione del segnale avviene tramite il *continuo travaso di energia tra campo magnetico ed elettrico* che caratterizza la propagazione delle onde elettromagnetiche. Questo processo a catena è attenuato da diversi fattori (uno di questi è la presenza dell'aria) ed è quindi giustificata la necessità di un amplificatore affinché il segnale raggiunga buone distanze.

Le onde elettromagnetiche sono caratterizzate da una frequenza e da una ampiezza. La frequenza alla quale viaggiano decide la classe a cui fa parte il tipo di onda utilizzata. Evitando di descrivere l'intero spettro delle

radiofrequenze (reperibile da [7]), diciamo soltanto che queste vanno da 3Hz a 300Ghz. Di queste solo una piccola porzione sono utilizzate dalle emittenti radiofoniche per la trasmissione dei propri canali.

2.3 Antenna

L'antenna è il componente della radio che si occupa dell'invio e della ricezione del segnale dal canale di trasmissione, cioè l'aria. Particolare importanza per questo componente ricopre la sua dimensione. Affinchè l'antenna di una radio possa ricevere e/o trasmettere egregiamente un segnale è bene che le sue dimensioni siano paragonabili alla lunghezza d'onda da cui è caratterizzato il segnale che si vuole trattare.

La lunghezza d'onda è indicata solitamente con λ , ed è direttamente ricavabile dalla frequenza:

$$\lambda = c \cdot T$$

dove

$$T = \frac{1}{f}$$

Con $c = 3 \cdot 10^8 m/s$, ovvero la velocità della luce e f , la frequenza del segnale. Ciò significa che un'onda in AM, con una frequenza di circa 680Khz, ha una lunghezza d'onda pari a 440 metri circa. Siccome nell'arco di un ciclo dell'onda la direzione varia quattro volte, lo spazio percorso dagli elettroni, in un quarto del tempo necessario ad un ciclo completo, è di circa 110 metri. Ecco spiegate le dimensioni delle antenne utilizzate dalle emittenti radiofoniche.

Naturalmente questa è una dimensione solamente *consigliata* e non necessaria, in quanto un'antenna più piccola può trattare ugualmente lo stesso segnale ma con risultati qualitativi scadenti.

2.4 Segnali modulati

Indichiamo ora brevemente il significato di modulazione del segnale analogico e quali sono le tecniche di interesse.

2.4.1 Processo di modulazione

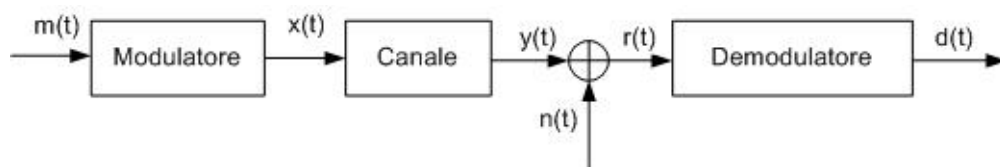


Figura 3: Invio di segnali

Il processo di modulazione consiste nei passi mostrati in figura 3. Il segnale modulante $m(t)$ è dato in input al modulatore che si occupa di rendere il segnale più adatto al trasferimento via etere. Il risultato ottenuto, $x(t)$ è così trasmesso lungo il canale di comunicazione.

Il segnale ricevuto $r(t)$ è una combinazione tra ciò che è stato ricevuto dal canale, $y(t)$ ed una certa quantità di rumore, rappresentata da $n(t)$. $r(t)$ va quindi demodulato per così ottenere $d(t)$.

2.4.2 Portante

L'obbiettivo della modulazione del segnale è quello di trasportare delle informazioni sottoforma di onde elettromagnetiche. L'informazione che vogliamo trasferire è anch'essa un'onda, che per semplicità è intesa come una semplice onda sinusoidale. Questa assunzione non restringe in alcun modo le possibilità della trasmissione, poiché, grazie alla trasformata di Fourier abbiamo la possibilità di rappresentare qualunque tipo di funzione come una particolare serie di funzioni sinusoidali.

Detto questo, possiamo continuare introducendo il concetto di portante (o *carrier*). La modulazione avviene infatti effettuando delle modifiche a determinate proprietà della portante, che altro non è che una funzione la cui frequenza è proprio quella del canale wireless utilizzato per la comunicazione. A seconda di quale proprietà della portante è modificata, si differenziano le varie tecniche di modulazione.

2.4.3 Modulazione di ampiezza

La modulazione di ampiezza altera, come potevamo immaginare, l'ampiezza della portante e la frequenza non viene quindi alterata. Matematicamente:

$$x(t) = (A_c + A_m m(t))c(t) \quad (1)$$

Dove t è la variabile rappresentante il tempo e $c(t)$ che descrive il segnale della portante e $m(t)$ il segnale di informazione (o modulante).

$$c(t) = \cos(2\pi f_c t); \quad m(t) = \cos(2\pi f_m t);$$

A_c è l'ampiezza della portante e A_m quella del segnale di informazione, mentre f_c ed f_m sono le loro rispettive frequenze.

Indice di modulazione L'indice di modulazione di ampiezza regola il rapporto tra le ampiezze del segnale di informazione e la portante:

$$n_a = \frac{A_m}{A_c}$$

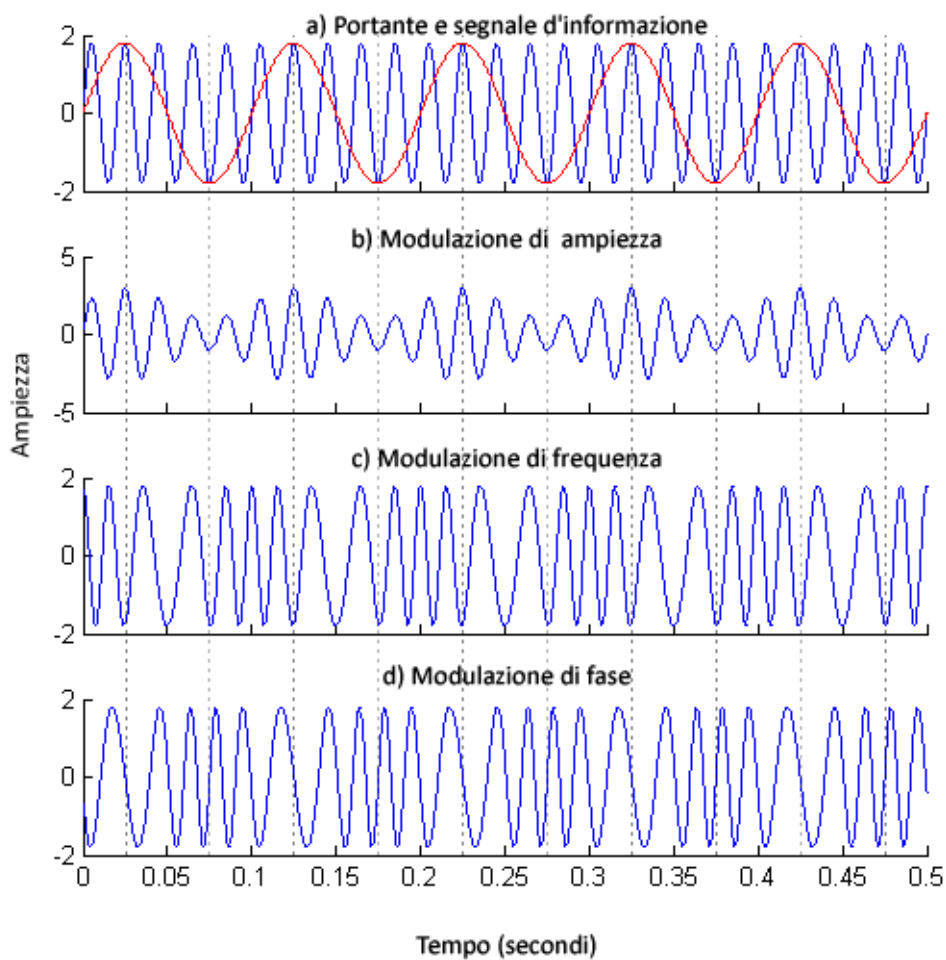


Figura 4: Confronto tra le tecniche di modulazione discusse. La modulazione di ampiezza modella la sagoma dell'onda, mentre la modulazione angolare modifica la frequenza. Nel caso della modulazione di frequenza l'aumento e la diminuzione della frequenza è proporzionale alla derivata prima della modulante, che, in questo caso, corrisponde alla modulante stessa sfasata di $1/4$ di periodo in avanti (un periodo è la distanza tra due linee tratteggiate marcate).

Possiamo quindi riscrivere l'equazione che descrive il segnale modulato, in termini di n_a :

$$x(t) = \left(1 + \frac{A_m}{A_c} m(t)\right) c(t) = (1 + n_a m(t)) c(t)$$

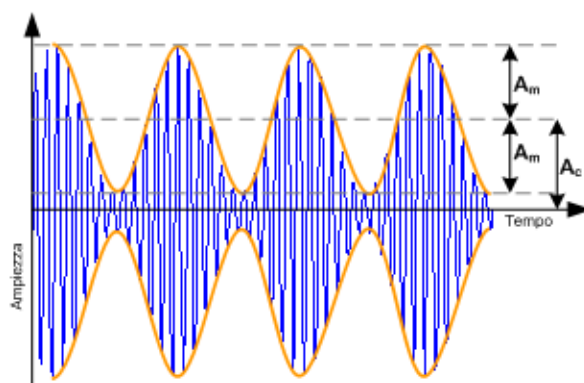


Figura 5: Le ampiezze dei segnali gestiscono la forma dell'onda modulata.

L'indice di modulazione è un parametro molto importante poiché decide quanto la portante è modulata. In genere i valori di questo parametro vanno da 0 (nessuna modulazione - 0%) a 1 (modulazione completa - 100%). Valori superiori a 1 non fanno altro che apportare una certa quantità di distorsione al segnale, un fenomeno, questo, chiamato *sovramodulazione*. L'effetto di un segnale sovramodulato è visibile in figura 6, mentre in figura 7 è possibile osservare la forma del segnale al variare di n_a .

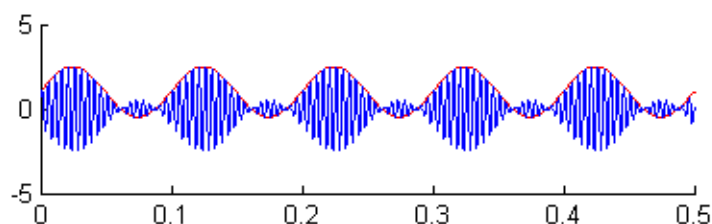


Figura 6: Sovramodulazione della portante. Il segnale di informazione è tracciato in rosso, il segnale modulato, in blu.

Effetti collaterali - *sidebands* Sebbene la semplicità della tecnica consente la realizzazione di ricevitori a basso costo, questo tipo di modulazione offre uno scarso risultato in termini qualitativi. Uno dei principali motivi della ridotta qualità del segnale è l'involontaria creazione di onde a frequenze intermedie dette *sidebands*.

La figura 7 mostra un esempio di un segnale modulato in ampiezza. (nel dominio delle frequenze). Come vedremo nella sottosezione 4.2.1 due onde

mescolate tra loro assumono un comportamento strano. Il prodotto di due segnali a frequenza f_c e f_m si traduce in tre picchi di frequenza, a $f_c - f_m$, f_c e $f_c + f_m$, le cui ampiezze sono, rispettivamente, $A_m/2$, A_c e $A_m/2$.

In figura 4b è riportato un esempio di modulazione di ampiezza (a confronto con le tecniche discusse nei prossimi paragrafi).

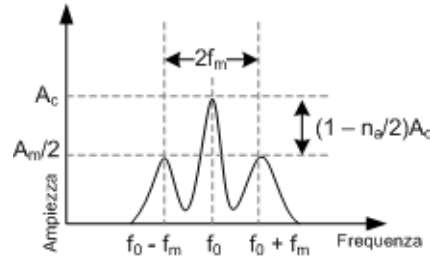


Figura 7: Aspetto di un segnale modulato in ampiezza nel dominio delle frequenze. f_c è la frequenza della portante, f_m quella del segnale informazione (si assume che sia una sola, prendendo in considerazione un segnale sinusoidale semplice), n_a è l'indice di modulazione ed A_c è l'ampiezza della portante.

Vediamo come è stata calcolata la differenza tra A_c e $A_m/2$. Sapendo che $A_m = n_a \cdot A_c$, abbiamo che:

$$A_c - A_m/2 = A_c - \frac{n_a \cdot A_c}{2} = \left(1 - \frac{n_a}{2}\right) A_c$$

Ad esempio con la portante pari alla metà della modulante, $n_a = 2$ e quindi abbiamo che la differenza tra i picchi di frequenze nel segnale modulato è nulla.

2.4.4 Modulazione angolare

A questa categoria appartengono la modulazione di fase e la modulazione di frequenza. La seguente formula generalizza queste due tipologie:

$$x(t) = A_c[\cos(2\pi f_c t + \phi(t))]$$

Dove f_c e A_c sono, rispettivamente, la frequenza e l'ampiezza della portante, mentre $\phi(t)$ è il fattore che differenzia modulazione di frequenza e di fase.

Modulazione di frequenza La modulazione di frequenza associa a $\phi(t)$ un valore tale da rendere la sua derivata prima proporzionale al segnale d'informazione:

$$\phi'(t) = n_f m(t)$$

Dove n_f è l'indice di modulazione di frequenza. In questo modo, il segnale prodotto avrà una frequenza maggiore quando la derivata prima del segnale informazione è positiva, viceversa, una frequenza minore quando la derivata prima ha valore negativo. La figura 4c mostra un esempio di modulazione di frequenza.

Modulazione di fase La modulazione di fase rende $\phi(t)$ direttamente proporzionale al segnale d'informazione:

$$\phi(t) = n_f m(t)$$

Dunque molto simile alla modulazione di frequenza, un esempio di modulazione di fase è in figura 4d.

Concludendo, la modulazione angolare non avendo a che fare con l'ampiezza del segnale presenta una maggiore resistenza alle interferenze, che agiscono proprio su questa caratteristica del segnale. Come rovescio della medaglia, non avendo una frequenza fissa, ma variabile in un certo range, la banda di frequenza richiesta è maggiore rispetto alla modulazione di ampiezza. Inoltre, ricevitori e trasmettitori non sono semplici come per quelli che gestiscono segnali in AM (un approfondimento sul confronto tra AM e FM è riportato nella sottosezione B.3).

2.5 Accesso multiplo

Le frequenze utilizzate vanno da 30 a 300KHz per la radio in AM e da 30 a 300MHz per quella in FM. Questo naturalmente, vale per *tutte* le emittenti radiofoniche che volessero trasmettere qualcosa. Il mezzo, ovvero l'etere, è dunque condiviso tra i vari trasmettitori, ed ogni ricevitore deve essere in grado di ricevere solo il segnale di un determinato trasmettitore, ovvero di poter selezionare quello desiderato. La suddivisione avviene in base alle frequenze. Ogni emittente *dovrebbe* utilizzare una frequenza diversa da tutte le altre.

In FM, ad ogni emittente è assegnata una banda di frequenza e non una frequenza singola. La suddivisione avviene assegnando 200Khz ad ogni stazione, utilizzando come valori di inizio e fine frequenze dispari (88.1, 88.3, e così via).

Sintonizzazione A questo punto il compito di un ricevitore radio, qualunque sia il tipo di modulazione utilizzato, è quello di sintonizzarsi sulla portante del canale di trasmissione desiderato. Il problema della selezione del canale desiderato è certamente non banale e la sua risoluzione è trattata nelle successive sezioni del documento.

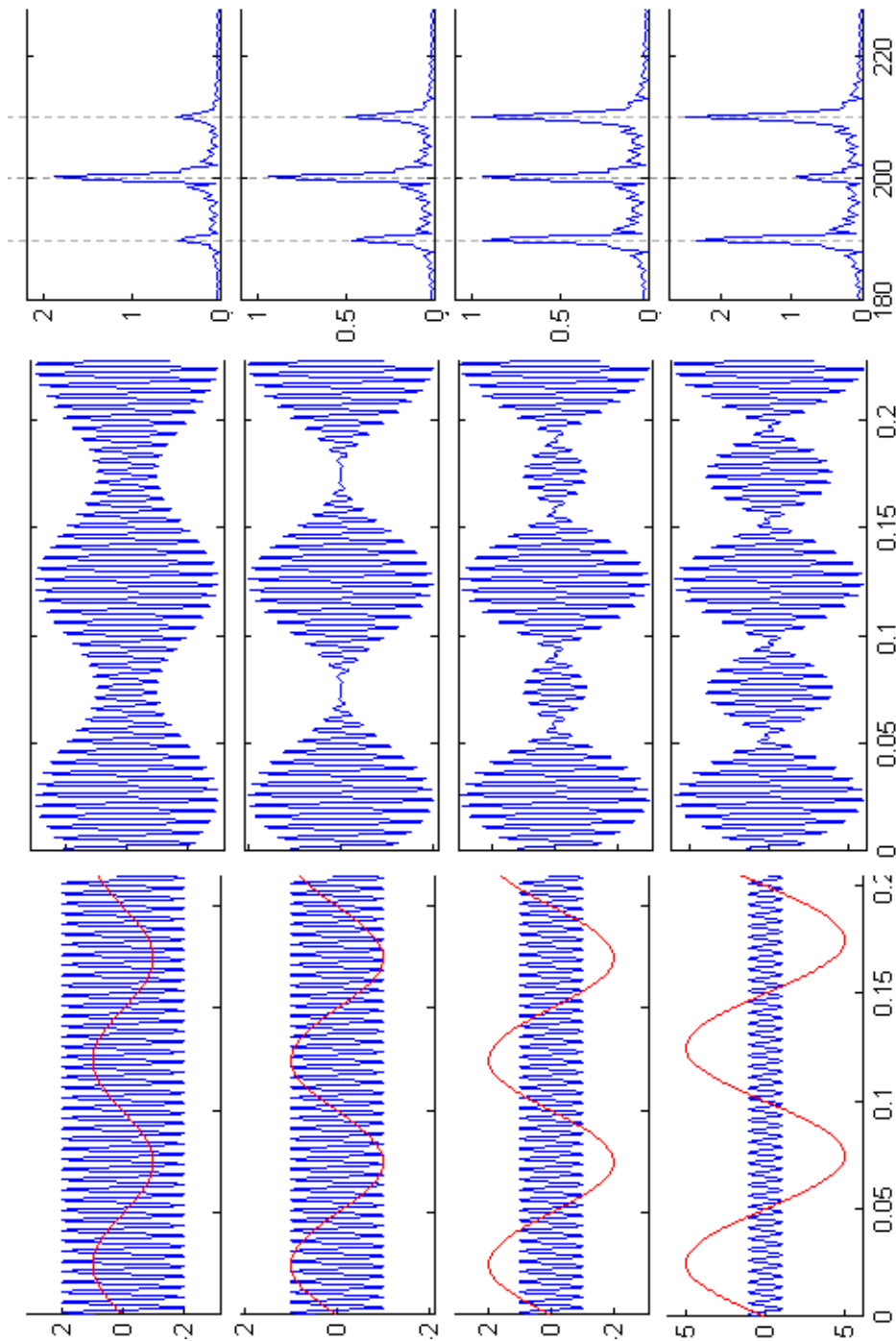


Figura 8: Esempio di variazione nel dominio del tempo e delle frequenze del segnale modulato in ampiezza a in base al rapporto tra le ampiezze di portante e modulante. La frequenza della portante è pari a 200Hz mentre quella della modulante è 10Hz. Le combinazioni $A_m:A_c$ sono quattro: 1:2, 1:1, 2:1 e 5:1, in ordine dall'alto verso il basso (rispetto la figura).

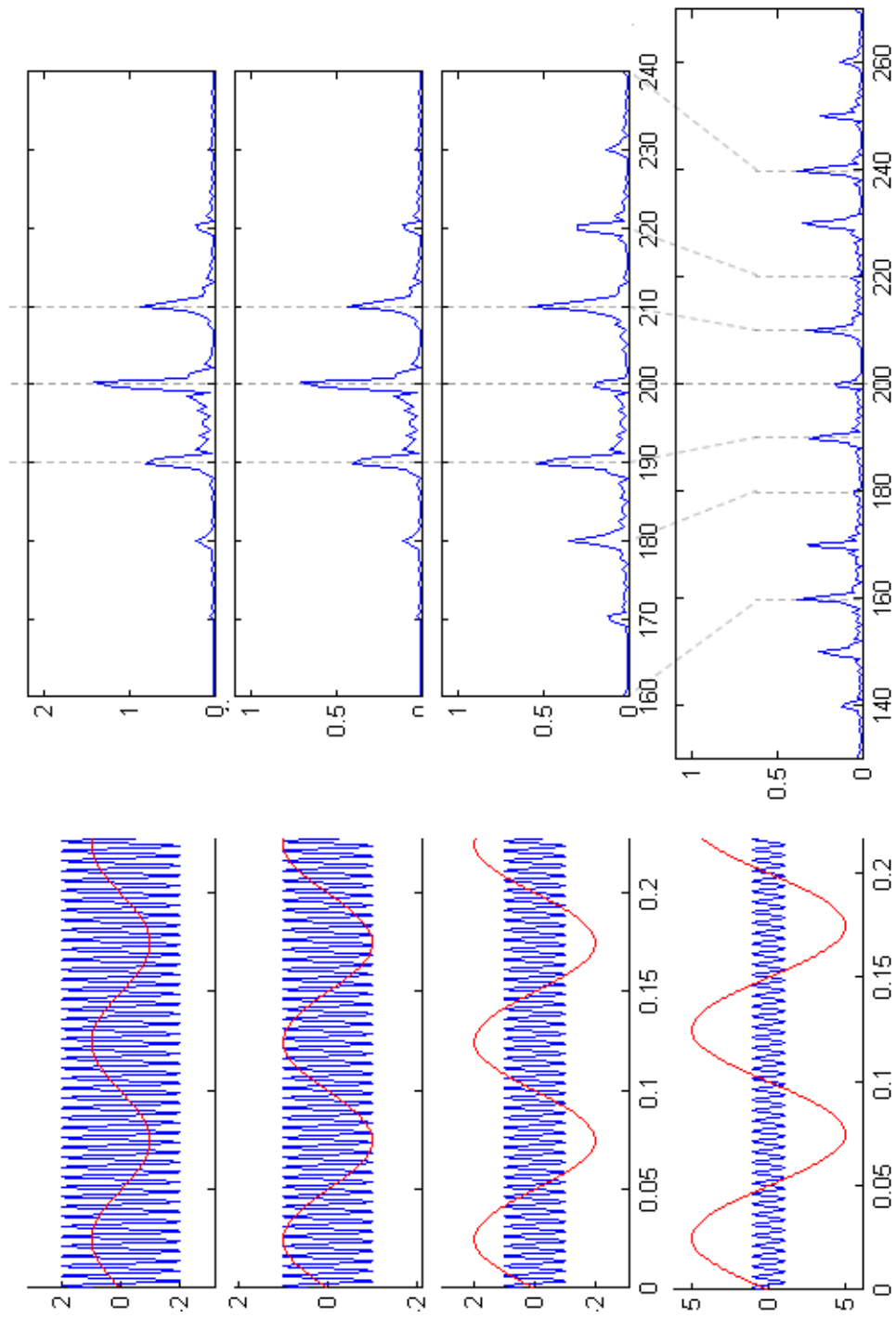


Figura 9: Esempio analogo a quello visto in figura 8, ma questa volta la modulazione è sulla frequenza. Le combinazioni di valori sono le stesse ma sono stati omessi i diagrammi nel dominio del tempo poiché poco significative.

3 Ricevitore radio a rilevazione diretta

Vediamo in questa sezione la struttura ed il funzionamento di una radio a rilevazione diretta.

3.1 La radio più semplice

Proseguendo sulla linea dei semplici esperimenti eseguiti nella sezione precedente, vediamo, ora, qualche altra prova interessante. Prendiamo una pila abbastanza potente (ad esempio, da 9v), un cavo conduttore e una radio in grado di ricevere segnali in AM. Avviciniamo la pila alla radio e facciamo in modo da collegare e scollegare ripetutamente i capi della pila con il cavo (figura 10). É possibile così udire degli *static*, ovvero delle interferenze alla radio, questo perché stiamo modulando il segnale in ampiezza.

Abbiamo così realizzato il più banale dei trasmettitori, date le ridottissime capacità, potendo inviare solo segnali di tipo si/no ad una distanza di pochi centimetri.



Figura 10: Esempio di trasmissione a modulazione di ampiezza

A differenza del trasmettitore, per quanto riguarda il ricevuto è possibile ottenere qualcosa di più completo. Se potessimo spostarci infatti nelle vicinanze di una emittente radio AM potremmo ascoltare il segnale inviato senza l'ausilio di complesse apparecchiature di amplificazione. Innalzando un cavo a qualche metro da terra, collegandoci una estremità di un *diodo* e collegando l'altra estremità di quest'ultimo a terra, siamo in grado di ascoltare la radio. Questo è possibile collegando un paio di auricolari ai capi del diodo, come in figura 11. Ciò accade perché:

- Non è necessario sintonizzarci sulla frequenza desiderata, dato che la potenza del segnale neutralizza tutte le altre.
- Non è necessario amplificare l'uscita, sempre per lo stesso motivo.

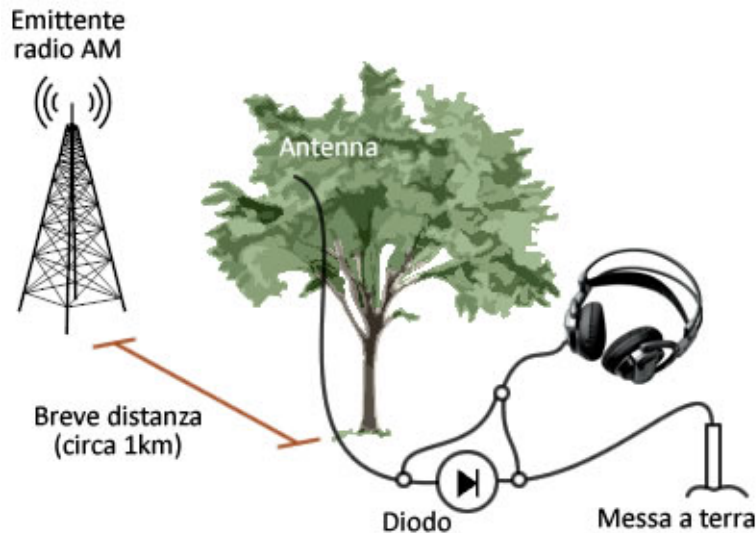


Figura 11: Esempio di ricezione di una stazione radio AM

3.2 Qualcosa di più complesso

Quella descritta nella sezione precedente è una radio che solamente accenna quello che è il reale funzionamento della radio a modulazione di ampiezza. Seppur più semplice della radio FM, la radio AM è realizzata tramite la cooperazione di diversi componenti elettronici. In figura 12 è possibile vedere lo schema di massima della radio AM.

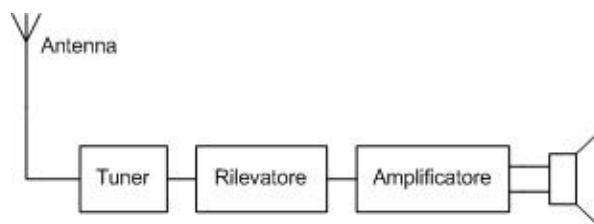


Figura 12: Schema di un ricevitore AM

Ecco una descrizione dei componenti presenti nello schema:

- Una antenna per la ricezione del segnale.

- Un tuner che si occupa della selezione della frequenza desiderata.
- Un rivelatore che preleva la parte utile dell'involucro di onde giunte al ricevitore.
- Un amplificatore che aumenta la potenza del segnale da inviare all'altoparlante.
- Un altoparlante per l'emissione del segnale audio.

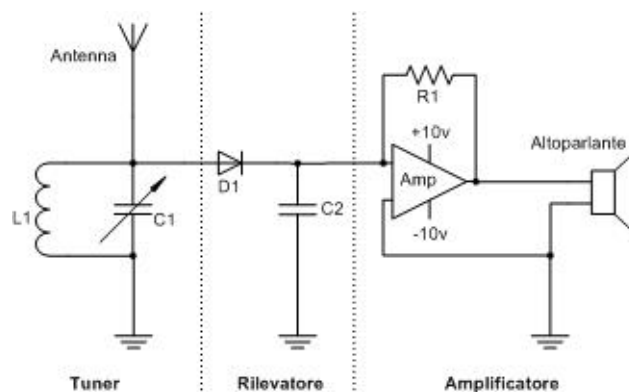


Figura 13: Circuito che implementa una semplice radio AM

Visto lo schema è possibile abbozzare il circuito che realizza questi componenti (figura 13). Il circuito è composto da:

- C1: capacitore variabile, funge da tuner. La sua regolazione decide la frequenza sulla quale la radio deve sintonizzarsi.
- D1: è il diodo che taglia il lato negativo del segnale, prelevando una semionda.
- L1: induttore, utilizzato anche come parte integrante dell'apparato di selezione della frequenza desiderata ma che funge anche da loopstick antenna, ovvero l'antenna interna.
- C2: capacitore, implementa il filtro passa-alto atto al prelievo solo della parte del segnale utile.

3.3 Funzionamento

Visti i componenti quali sono, bisogna ora spiegare come funzionano.

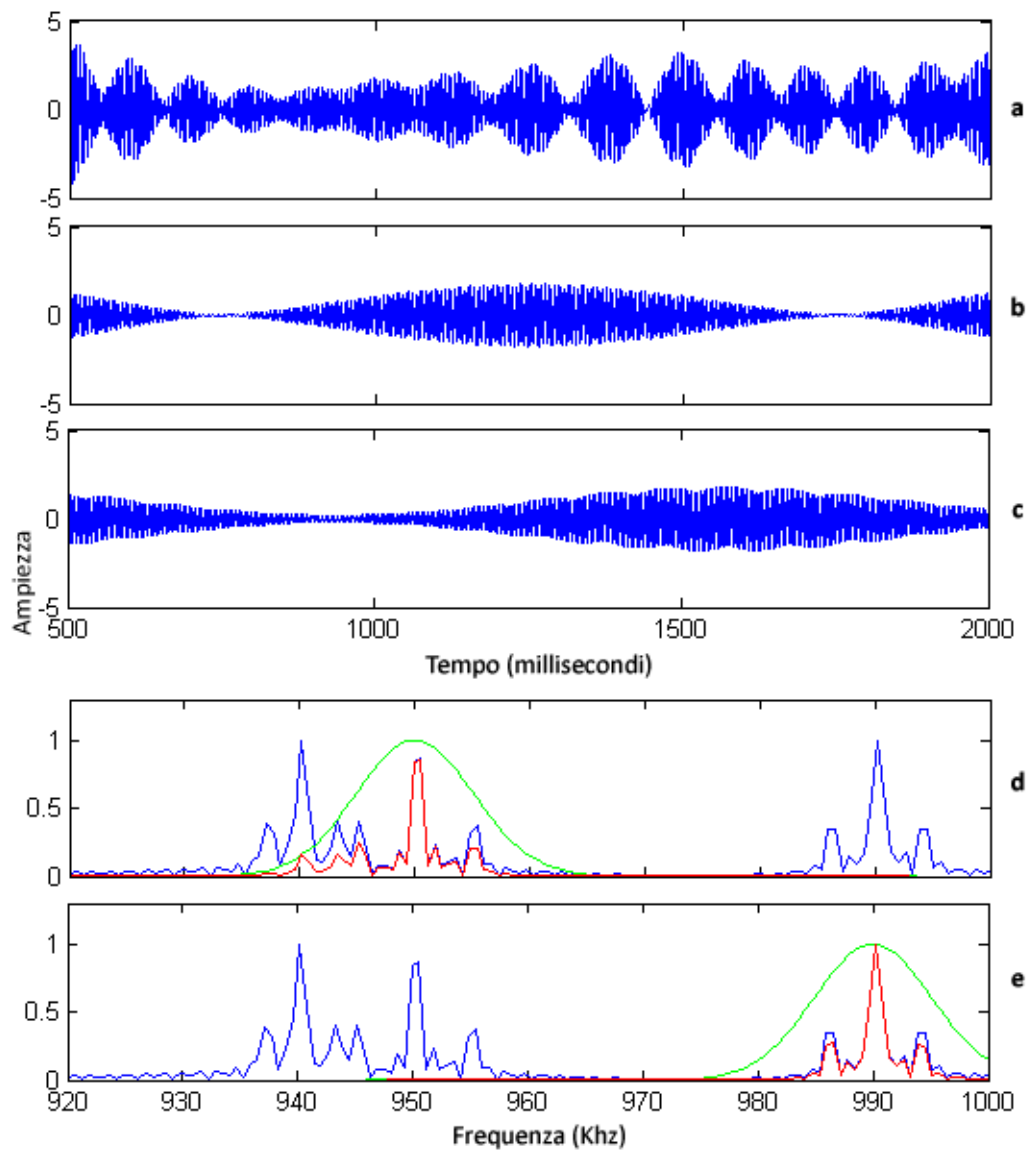


Figura 14: a) segnale ricevuto. Si tratta di un mix di 3 diversi segnali sulle portanti a 940, 950 e 990Khz, modulati con segnali sinusoidali, rispettivamente, a 3, 2 e 4Khz; b) risultato della fase tuning sulla frequenza a 950Khz - modulato a 2Khz. c) come b ma sulla frequenza a 990Khz - modulato a 4Khz; d) Grafico nel dominio delle frequenze che mostra in verde la curva di risonanza, in blu le frequenze non filtrate ed in rosso il risultato del tuning sulla frequenza di b (950Khz); e) come d ma sulla frequenza 990Khz. I grafici nel dominio delle frequenze sono stati creati mediante il comando `fft`, *Fast Fourier Transform*, di Matlab.

3.3.1 Tuning

Il tuning della frequenza scelta avviene per mezzo della regolazione del capacitore variabile. I componenti del circuito L e C hanno una certa frequenza di *risonanza*. Questa frequenza è proprio quella che è selezionata, oscurando tutte le altre. È infatti tramite la regolazione del capacitore che è possibile variare la frequenza di risonanza e quindi selezionare differenti stazioni radio.

In figura 14a è mostrato un grafico con tre segnali modulati in ampiezza. Da sottolineare che si tratta di segnali generati artificialmente e quindi ben lontani da quello che accade realmente in realtà; con, l'unico scopo, quindi, di rendere più chiaro il discorso.

Ciò che si ottiene dalla fase di tuning è visibile in figura 14b. Supponendo di esserci sintonizzati sulla frequenza dell'onda, il risultato è che tutte le altre frequenze risulteranno attenuate, perché diverse dalla frequenza di risonanza, e quindi lontane dal picco in figura 14d (in verde). Da notare come segnali vicini in figura 14d creino interferenza tra loro a causa delle sideband. La ricezione del segnale a 950Khz è infatti turbata dal segnale vicino a 940Khz, a causa della banda inferiore della prima a $950 - 2 = 948$ che è molto vicina alla banda superiore della seconda a $940 + 3 = 943$.

Circuito d'accordo L'apparato appena descritto implementa circuito d'accordo. La frequenza di risonanza f_0 è calcolabile come segue:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

A questa frequenza avviene uno scambio reciproco di cariche elettriche tra L e C portando ad una sorta, seppur ridottissima amplificazione del segnale. Per tutte le altre frequenze avviene una attenuazione secondo la *curva di risonanza* del circuito, come visibile in figura 14d (in verde).

3.3.2 Rilevazione

La rilevazione si occupa della demodulazione del segnale trasmesso. In questo caso è stato usato un **demodulatore di involuppo** che comprende tutto l'apparato di rilevazione indicato in figura 13. Questa operazione avviene tramite la combinazione degli effetti di un filtro passa basso ed un diodo.

Il diodo si occupa di far passare solamente la parte positiva dell'onda, ovvero la parte in blu non tratteggiata visibile in figura 15. Il capacitore in parallelo effettua filtra le frequenze più alte, mantenendo l'energia necessaria al non decadimento del segnale, come mostrato dalla linea in rosso sempre in figura 15, ottenendo in questo modo una approssimazione del segnale modulato che è stato trasmesso.

A questo punto resta solo da amplificare il segnale che si è ottenuto in modo da renderlo udibile con l'altoparlante.

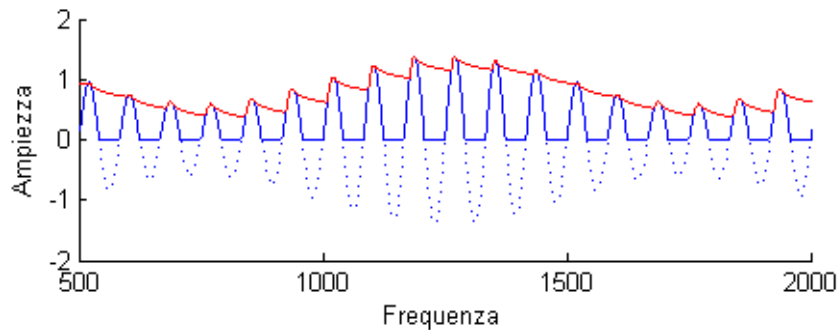


Figura 15: Rilevazione del segnale tramite un demodulatore di involuppo

4 Ricevitore radio a supereterodina

In questa sezione vediamo il funzionamento della radio basata sul principio supereterodino. Questo tipo di radio, alternativa a quella basata sulla rilevazione diretta vista nella sezione precedente, è quella comunemente usata oggi.

4.1 Problemi di affollamento

La tecnica di ricezione vista nella sezione 3 funziona egregiamente fin quando le stazioni radio sono poche e soprattutto ben distanziate. Il funzionamento di questo tipo di radio si basa sul concetto di filtraggio di una certa banda di frequenza tramite circuiti accordati. Il problema di questo sistema è chiaramente visibile in figura 14d. Le frequenze indesiderate e le bande laterali di altri canali vicini sono semplicemente attenuate e non eliminate, dovuta ad una di filtraggio decisamente smussato. Questo si traduce in poca sensibilità e incapacità di distinzione tra segnali tra loro vicini.

4.2 Principio supereterodino

L'idea è nata nel 1917 quasi contemporaneamente dalle menti di Edwin Howard Armstrong in America e Lucian Levy in Francia, poco dopo la necessaria regolarizzazione dell'uso poco appropriato dell'etere che si faceva in quel periodo.

Il principio si basa sul concetto di *mescolare*, tramite uno strumento, chiamato mixer, due segnali a frequenze simili al fine di ottenerne un terzo segnale *più facile da gestire*. Prima di inoltrarci nello specifico è bene introdurre alcuni concetti propedeutici al proseguimento della discussione, chiarificando un discorso già iniziato nella sezione precedente, riguardante il mixing di segnali.

4.2.1 Mixing di onde

Abbiamo visto già che l'onda modulata in ampiezza altro non è che la sovrapposizione di due onde.

É bene a questo punto formalizzare il discorso del mixing di onde dando una spiegazione più matematica della cosa.

Riproponiamo a tal proposito l'equazione 1 che descrive un segnale modulato in ampiezza:

$$x(t) = (A_c + A_m m(t))c(t)$$

Sostituendo a $m(t)$ e $c(t)$ i rispettivi valori in termini della frequenza:

$$x(t) = [A_c + A_m \cos(2\pi f_m t)] \cos(2\pi f_c t)$$

Proseguiamo effettuando il prodotto:

$$= A_c \cos(2\pi f_c t) + A_m \cos(2\pi f_m t) \cos(2\pi f_c t)$$

Otteniamo così un prodotto diretto tra coseni. Applicando la seguente legge di Werner:

$$\cos(A) + \cos(B) = \frac{1}{2} [\cos(A - B) + \cos(A + B)]$$

É possibile ottenere il seguente risultato:

$$x(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) + \frac{A_m}{2} \cos[2\pi(f_c - f_m)t] + \frac{A_m}{2} \cos[2\pi(f_c + f_m)t]$$

Abbiamo quindi ottenuto un composto di tre diversi segnali, ovvero, la portante ed altri due, totalmente nuovi che corrispondono esattamente alla differenza ed alla somma delle frequenze di portante e informazione.

É spiegato in questo modo anche il risultato della modulazione in ampiezza e l'aspetto assunto nel dominio delle frequenze.

4.2.2 Input al mixer

Abbiamo visto cosa succede quando sono miscelate due onde con diversa frequenza. Come detto nella introduzione alla sezione, l'obiettivo del principio supereterodino e quello di miscelare l'onda ricevuta dal trasmettitore con un'altra al fine di semplificare la successiva decodifica. Ebbene, la seconda onda da dare in pasto ad un apparato miscelatore è da produrre artificialmente ed in modo locale tramite un oscillatore.

4.2.3 Frequenze intermedie

Bisogna ora completare il discorso, prima di passare alla parte pratica delle prossime sottosezioni, per capire a cosa ci serva realmente questa operazione di mixing di segnali.

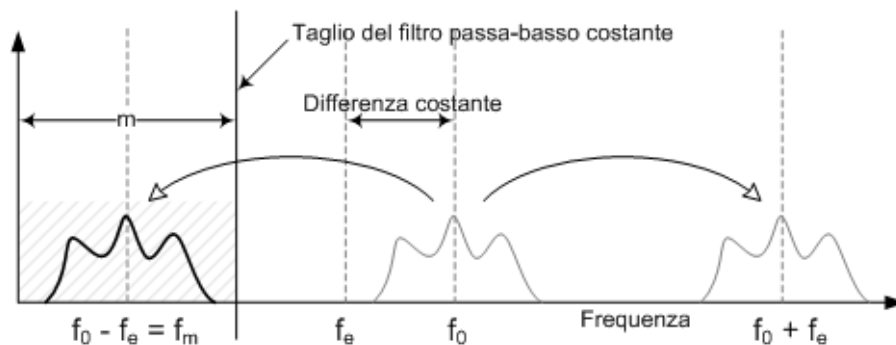


Figura 16: Mostra lo schema del principio supereterodino. Il prodotto tra le frequenze f_0 e f_e produce due immagini di frequenza a $f_0 - f_e$ e $f_0 + f_e$, evidenziate con delle frecce in bianco. Se la differenza tra f_0 e f_e è costante, è possibile utilizzare un filtro non variabile per prelevare solamente la parte evidenziata, f_m .

La figura 16 mostra un segnale modulato in ampiezza. Per costonizzare una radio a rilevazione diretta su questa frequenza f_0 bisognerebbe modificare il valore del capacitore variabile fino a far combaciare la suddetta frequenza con quella di risonanza dell'apparato di tuning. Per via dei problemi descritti ad inizio sezione bisogna trovare un sistema alternativo.

Anzichè costonizzarci su quella frequenza, effettuiamo il mixing del segnale in ingresso con il segnale dell'oscillatore opportunamente regolato ad una determinata frequenza, f_e . Come visto prima il mixing produce due ulteriori segnali a frequenze pari alla somma e la differenza delle due in ingresso, ovvero $f_0 - f_e$ e $f_0 + f_e$.

Possiamo ora capire per quale motivo stiamo facendo tutto questo. L'obiettivo dell'apparato di mixing è quella di mantenere costante la differenza $f_m = f_0 - f_e$. Ciò può essere ottenuto *accordando* i regolatori del segnale proveniente dall'antenna con quello proveniente dall'oscillatore. Il segnale risultante ha così una frequenza f_m costante, detta frequenza intermedia (IF).

Partendo da questo presupposto, possiamo utilizzare un filtro passa-basso non variabile centrato su f_m per tagliare facilmente $f_0 + f_e$.

La modulazione del segnale a frequenza f_m è pari alla modulazione di quello di partenza. Questo segnale può essere, infatti, dato in input ad un demodulatore di involuppo, come quello visto nella sezione precedente, che si occupa della rilevazione del segnale di informazione.

4.2.4 Frequenze immagine

Ultimo problema da affrontare sono le frequenze immagine. É infatti possibile che si verifichi la situazione illustrata in 17. Potrebbe capitare che un

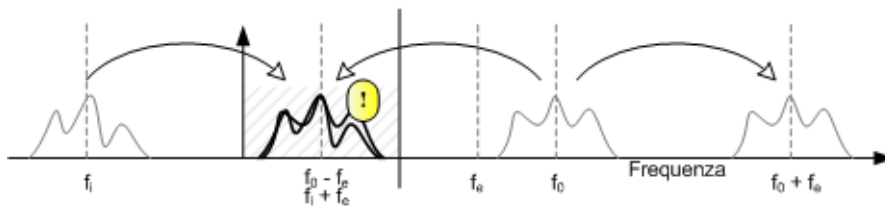


Figura 17: Illustra il problema delle frequenze immagine. f_0 e f_i hanno una immagine comune, il che crea dei problemi di demodulazione.

ulteriore segnale f_1 sia tale che $f_1 + f_e$ si avvicini a f_m e che quindi possa passare il filtro delle frequenze intermedie. Situazioni del genere solo evitate filtrando i segnali in ingresso all'antenna tutti i segnali più lontani di $2f_m$ dalla frequenza di interesse (figura 18).

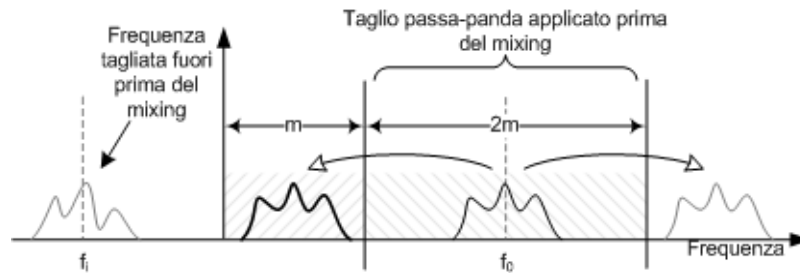


Figura 18: La risoluzione alla situazione vista in figura 17 è risolta filtrando la banda di frequenza di ampiezza $2m$ evidenziata in figura.

4.3 Composizione

Il figura 19 è possibile osservare lo scema dei componenti di una radio basata sul principio supereterodino.

Ecco una descrizione dei componenti in gioco:

- Amplificatore e filtro RF: apparato amplificazione del segnale proveniente dall'antenna (radiofrequenze) e di filtraggio delle frequenze indesiderate aventi la stessa immagine di quella richiesta. Si tratta di un filtro passa-banda che taglia tutto ciò che è più distante di $2f_m$ dalla frequenza di interesse.
- Mixer: esegue il mixing dei segnali provenienti dall'oscillatore e dall'antenna.
- Amplificatore e filtro IF: come per le radiofrequenze, questo apparato amplifica soltanto le frequenze medie f_m .

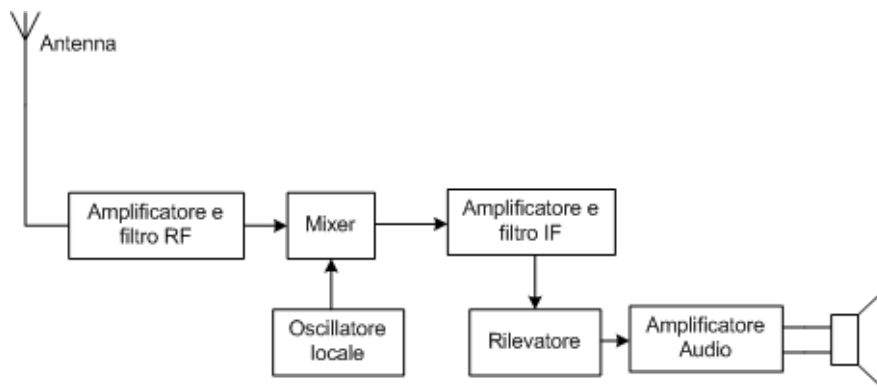


Figura 19: Schema di un ricevitore a supereterodina.

- Rilevatore: si tratta dello stesso tipo di demodulatore ad involuppo visto nella sezione 3.
- Amplificatore Audio/Altoparlante: amplificatore ed altoparlante finali della radio.

Visto lo schema basilare possiamo ora mostrare l'aspetto circuitale dei principali componenti della radio, in figura 20.

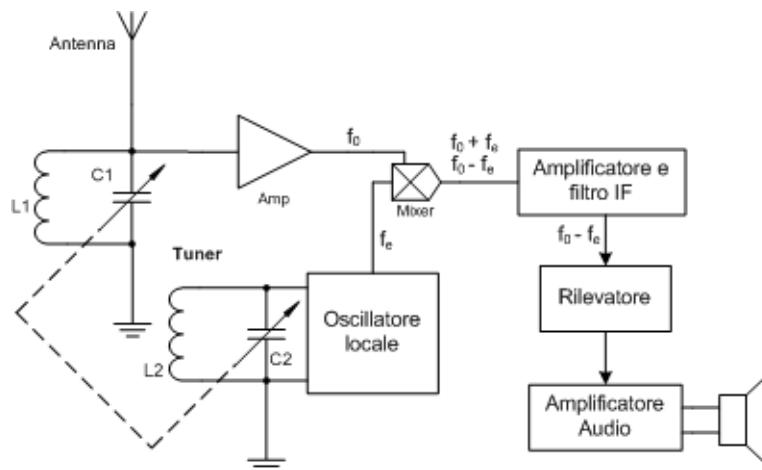


Figura 20: Circuito di un semplice ricevitore a supereterodina.

La linea tratteggiata tra i condensatori variabili C1 e C2 indica che sono accordati, ovvero che sono soggetti alla stessa quantità di variazione (sono ad. es. collegati alla stessa manopola).

4.4 Funzionamento

4.4.1 Tuning

Il tuning avviene per mezzo di due circuiti accordati, uno collegato direttamente all'antenna, l'altro, collegato all'oscillatore locale, che permettono la selezione della banda di frequenza desiderata. Il principio di funzionamento è lo stesso visto nella sezione 3.3.1, ossia basato sulla regolazione della frequenza di risonanza.

È importante che i due condensatori C_1 e C_2 siano soggetti alla stessa variazione in modo da permettere l'erogazione dal miscelatore della frequenza intermedia f_m .

4.4.2 Rilevazione

La rilevazione del segnale avviene tramite un semplice demodulatore di involuppo, esattamente come visto per la radio a rilevazione diretta.

Da notare che, in sostanza, è il rivelatore a differenziare le varie tipologie di radio esistenti. Il demodulatore di involuppo è, infatti, solo uno dei possibili sistemi utilizzabili per la rilevazione del segnale d'informazione.

A Bande laterali

Come discusso nella sezione 2.4 un problema che affligge la comunicazione in AM sono le bande laterali.

In genere è possibile manipolare il segnale in modo da gestire il comportamento delle bande laterali.

A.1 Banda laterale doppia (BLD)

Il segnale a banda laterale doppia è il più semplice ma anche il più inefficiente metodo di trasmissione di segnali analogici. La banda occupata dal segnale risultante dopo la fase di modulazione $x(t)$ è infatti doppia rispetto a $m(t)$.

Abbiamo parlato nel corso del documento di sovramodulazione, gestibile tramite l'indice di modulazione. In aggiunta, nell'ambito della banda laterale doppia è possibile differenziare tre sottotipi di modulazione, a seconda del peso del segnale informazione sulla portante, variando lo sfasamento verticale di $m(t)$. Riproponiamo a questo proposito l'equazione che gestisce la modulazione in ampiezza in BLD (equazione 1):

$$x(t)(A_c + A_m m(t))c(t)$$

Dove $c(t)$ è il segnale della portante e $m(t)$ il segnale informazione.

A seconda dei valori di A_c e A_m si differenziano le seguenti tecniche.

A.1.1 Portante soppressa

Con A_c prossima a 0 si rende la portante nulla, risparmiando potenza di trasmissione. Questo implica però che, lato ricevitore, sia il segnale $c(t)$ sia rigenerato localmente, tramite tecniche, ad esempio, di quadratura.

A.1.2 Portante intera

Con $A_c > A_m \cdot \max|m(t)|$ si fa in modo da non permettere per nessun valore di $m(t)$ l'annullamento della portante, avendola così nella trasmissione.

A.1.3 Portante parzialmente soppressa

Con $0 < A_c < A_m \cdot \max|m(t)|$ si ha una via di mezzo tra le due appena viste. In questo caso il residuo di portante può facilitare la ricostruzione al ricevitore.

A.2 Banda laterale unica (BLU)

È possibile rendere maggiormente efficiente la trasmissione del segnale tagliando le frequenze di una delle due bande laterali e della portante.

La sua realizzazione, in breve, consiste nel sommare due componenti diverse, $m(t)$ ed $\hat{m}(t)$, al fine di neutralizzare una delle due bande laterali.

La realizzazione è possibile tramite un filtro di Hilbert per l'ottenimento della componente $\hat{m}(t)$ oppure utilizzare un filtro normale che tagli letteralmente una delle bande.

Maggiori dettagli sulla BLU sono reperibili da [1]

B Efficienza della trasmissione in AM

Questa appendice tratta la stima della potenza di un segnale modulato in ampiezza e le problematiche di trasmissione dovute al rumore.

B.1 Potenza del segnale

Ricordiamo, che la potenza dissipata da un resistore R in presenza di una sorgente di segnali sinusoidali di ampiezza A_{src} è calcolabile tramite utilizzando la tensione efficace, rappresentata da A_{RMS} :

$$P_{tot} = \frac{A_{RMS}^2}{R} = \frac{(A_{src}/\sqrt{2})^2}{R} = \frac{A_{src}^2}{2R}$$

Abbiamo visto in 4.2.1 come la mistura di due onde si traduce nella somma di tre differenti onde, ovvero

$$x(t) = A_c c(t) + \frac{A_m}{2} lsb(t) + \frac{A_m}{2} usb(t)$$

con:

$$lsb(t) = \cos[2\pi(f_c - f_m)t]$$

$$usb(t) = \cos[2\pi(f_c + f_m)t]$$

La potenza totale dissipata dall'antenna è quindi la somma delle potenze dissipate da ogni segnale:

$$\begin{aligned} P_{tot} &= P_c + P_{lsb} + P_{usb} = \\ &= \frac{(A_c/\sqrt{2})^2}{R} + \frac{(A_m/2\sqrt{2})^2}{R} + \frac{(A_m/2\sqrt{2})^2}{R} \\ &= \frac{A_c^2}{2R} + \frac{A_m^2}{8R} + \frac{A_m^2}{8R} \end{aligned}$$

Prendiamo ora in considerazione l'indice di modulazione che, ricordiamo è $n_a = \frac{A_m}{A_c}$. Sostituiamo nella equazione della potenza totale, l'ampiezza del segnale d'informazione con la sua rappresentazione in termini di n_a e A_c :

$$\begin{aligned} P_{tot} &= \frac{A_c^2}{2R} + \frac{(n_a A_c)^2}{8R} + \frac{(n_a A_c)^2}{8R} \\ &= \frac{A_c^2}{2R} \left(1 + \frac{n_a^2}{4} + \frac{n_a^2}{4} \right) \end{aligned}$$

Concludiamo semplificando la precedente:

$$P_{tot} = P_c \left(1 + \frac{n_a^2}{2} \right)$$

Dunque la potenza dissipata dipende in modo quadratico dall'indice di modulazione, rendendo quest'ultimo un fattore molto importante per la regolazione dei consumi in fase di trasmissione.

Ad esempio, per un valore $n_a = 0.5$ e di $P_c = 30W$ avremmo che la potenza totale $P_t = 33.75W$. La potenza nelle bande laterali è di 3.75, 1.875 in ognuna di esse.

B.2 Rumore e SNR

La quantità di rumore che affligge le trasmissioni è sintetizzabile in un parametro chiamato *SNR*. Il suo valore è dato da:

$$SNR(f) = \frac{P_x(f)}{P_v(f)}$$

Dove P_x è la potenza del segnale e P_v la potenza del rumore, utilizziamo valori in funzione della frequenza. Mentre la potenza totale di un segnale in AM è stata già trattata in precedenza, dobbiamo dare una quantificazione alla potenza del rumore.

Considerando un rumore additivo gaussiano bianco (ossia costante) con la seguente densità di potenza:

$$P_n(f) = \frac{N_0}{2}$$

Prima di effettuare la demodulazione del segnale si può utilizzare un filtro di ricezione $H_R(f)$ per eliminare la banda del rumore ricevuto e ridurre la potenza in ingresso al ricevitore.

La potenza del rumore *filtrato* è dunque:

$$P_v(f) = P_n(f)|H_R(f)|^2$$

Data l'impossibilità di utilizzare un filtro ideale, la banda delimitata è più ampia e smussata di quello che dovrebbe essere. Se chiamiamo B_v la banda reale e B_N quella ideale e sostituendo $P_n(f)$ abbiamo che:

$$P_v(f) = \frac{N_0}{2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |H_R(f)|^2$$

Siccome abbiamo simmetria della banda di frequenza in positivo e negativo possiamo effettuare il seguente passaggio:

$$P_v(f) = \frac{N_0}{2} \cdot 2 \cdot \int_0^{\infty} |H_R(f)|^2$$

Possiamo, ora, sostituire l'area rappresentante l'integrale con il prodotto tra quello che dovrebbe essere la risposta del filtro ideale e quello che rimane di reale, naturalmente, riferendoci a questo punto alla frequenza della portante f_c :

$$P_v(f) = N_0 B_N |H_R(f_c)|^2$$

A seconda del tipo di modulazione AM utilizzata (BLD, BLU, oppure BLR) abbiamo differenti valori di B_N . Nel più semplice dei casi, la banda laterale doppia, B_N assume il valore del doppio della banda del segnale di informazione W , dunque $2W$. Da qui:

$$SNR(f) = \frac{P_x(f)}{P_v(f)} = \frac{P_m(f)}{2WN_0}$$

Dove $P_m(f)$ è la potenza di messaggio pari a $\frac{1}{2}P_x(f)$, a causa della distribuzione di potenza che si ha in egual modo tra le portante e le bande laterali. In conclusione:

$$SNR(f) = \frac{P_x(f)}{WN_0}$$

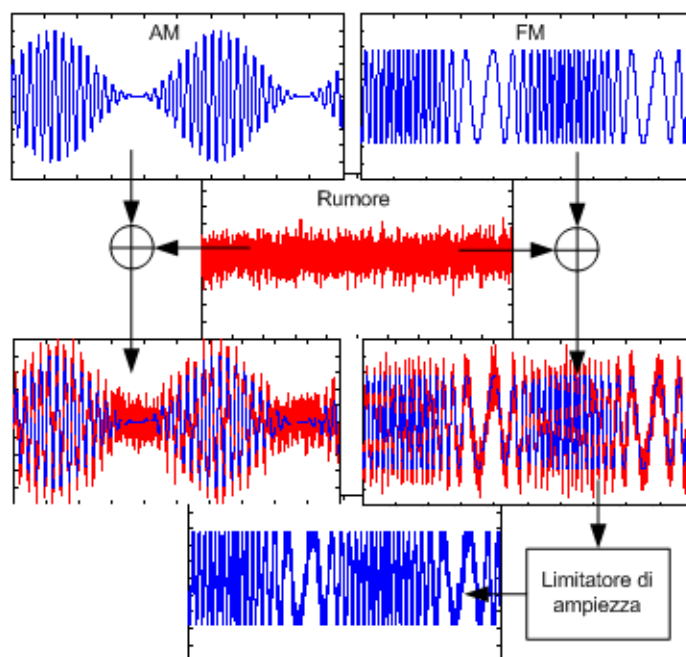


Figura 21: Aggiunta di rumore a segnali modulati in AM e FM.

B.3 Confronto AM-FM

Descriviamo brevemente come il rumore si impone su di un segnale modulato al fine di capire quale tipo di modulazione sia più resistente ai disturbi.

In figura 21 è facile vedere come un segnale in FM sia molto più resistente in quanto la semplice applicazione di un limitatore di ampiezza rende il segnale ampliamene recuperabile, mentre nel segnale AM risulta fortemente compromessa la sagoma portando ad una alterazione del segnale di informazione.

C Script Matlab utilizzati

Questa appendice illustra brevemente gli script Matlab realizzati appositamente per la creazione di alcuni dei grafici riportati nella relazione.

C.1 Modulation.m

Questo script è stato usato per la generazione dei grafici in figura 4. Il listato in esso contenuto è molto semplice ed implementa le formule riportate nella sezione 2.4.

C.2 AM.m

Usato per la generazione dei grafici in figura 14. Si tratta di uno script leggermente più complesso del precedente in quanto, oltre a mostrare le funzioni di segnali AM nel dominio del tempo, sono riportate diagrammi nel dominio delle frequenze.

I diagrammi nel dominio delle frequenze sono stati realizzati tramite la funzione `fft`. Ecco un esempio di uso di questa funzione:

```
% Calcola la trasformata di fourier sui dati 'received'
Y = fft(received,NFFT)/L;

% Fissa la finestra di frequenze da mostrare
fxLBound = 920;
fxUBound = 1000;

% Effettua il plotting dopo la normalizzazione
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2)))
% Applica il bound sugli assi cartesiani
axis([fxLBound fxUBound 0 1.3]);
```

La gaussiana (in verde in figura) è stata utilizzata per attenuare le frequenze fuori banda.

C.3 Demodulation.m

L'ultimo script realizzato, il cui risultato è visibile in figura 15.

Il decadimento graduale della tensione è stato simulato con costruito iterativo che permette la scesa non lineare del tracciato in rosso rappresentante l'uscita dell'apparato di rilevazione.

Note bibliografiche

Le informazioni per l'apprensione del funzionamento basilare della radio è stato appreso da [2]. Gli aspetti matematici e la descrizione del processo di modulazione dei segnali e le formule riguardo potenza e rumore, sono stati reperiti da [1], [8] e [9]. Gli aspetti circuitali sono stati appresi da [6], [5] e [3]. La comprensione del principio supereterodina è stato appreso da [5], [3], [1] e [4].

Riferimenti bibliografici

- [1] Alessandro Falaschi, *Elementi di Trasmissione dei Segnali e Sistemi di Telecomunicazione*, Versione 0.97.2 - Gennaio 2006
<http://infocom.uniroma1.it/alef/libro>
- [2] Marshall Brain, *How Radio Works*,
<http://www.howstuffworks.com/radio.htm>
- [3] Lloyd Butler, *Introduction to the Superheterodyne Receiver*
<http://users.tpg.com.au/ldbutler/Superhet.htm>
- [4] *The superhet or superheterodyne radio receiver*
<http://www.radio-electronics.com/info/receivers/superhet/superhet.php>
- [5] *Come funziona un Ricevitore Supereterodina*
<http://www.leradiodisophie.it/supereterodina.html>
- [6] Leo Alberto Ugo, *Principio di funzionamento della Radio*
http://www.leo-alberto.it/princ_radio.ht
- [7] Marshall Brain, *How the Radio Spectrum Works*
<http://electronics.howstuffworks.com/radio-spectrum.htm>
- [8] Keith Kintzley, Currie Wooten *Lesson 7: Amplitude Modulation*
<http://www.usna.edu/EE/ee302/schedule.htm>
- [9] Keith Kintzley, Currie Wooten *Lesson 8: Amplitude Modulation*
<http://www.usna.edu/EE/ee302/schedule.htm>