

OSCILLATORI, ONDE E RADIO

Breve escursione sui principi fisici che spiegano una delle più affascinanti scoperte della scienza moderna.

Mario Marobin
Ottobre 2013

PREMESSA.....	2
OSCILLATORE MECCANICO LIBERO E FORZATO	2
OSCILLATORE ELETTRICO LIBERO E FORZATO	3
OSCILLATORI IN ALTA FREQUENZA.....	5
ONDE ELETTROMAGNETICHE	6
RICEVITORE RADIO AM.....	8
SULLE ONDE RADIO	10
CENNI STORICI	12



PREMESSA

Tanti anni fa un giovane adolescente di dodici anni ascoltava per la prima volta Radio Praga dalle cuffie di una radio a galena autocostruita, senza alcuna cognizione di causa, seguendo le istruzioni di assemblaggio di una rivista dell'epoca. Oggi, tanti anni dopo, con completa cognizione di causa, vogliamo spiegare a quell'adolescente i principi fisici alla base di quel fatto emozionante. L'analogia fra le oscillazioni meccaniche e quelle elettriche è un passo che facilita sicuramente la comprensione del fenomeno della risonanza che è fondamentale per il contesto. Segue l'oscillatore elettronico in alta frequenza come generatore di onde radio e la descrizione delle onde elettromagnetiche che sono un complesso modello matematico atto a spiegare coerentemente un secolo di sperimentazioni fisiche su elettricità e magnetismo. Infine la radio a galena chiude il percorso svelandoci così l'intero mistero delle comunicazioni a distanza senza fili.

OSCILLATORE MECCANICO LIBERO E FORZATO

Il modello dinamico di un sistema meccanico contempla tre forze:

1. forza elastica $F=kx$ dipendente dalla deformazione x con k costante elastica
2. forza dissipativa $F=\lambda v$ dipendente dalla velocità v con λ costante di smorzamento
3. forza inerziale $F=ma$ dipendente dall'accelerazione a con m massa del sistema.

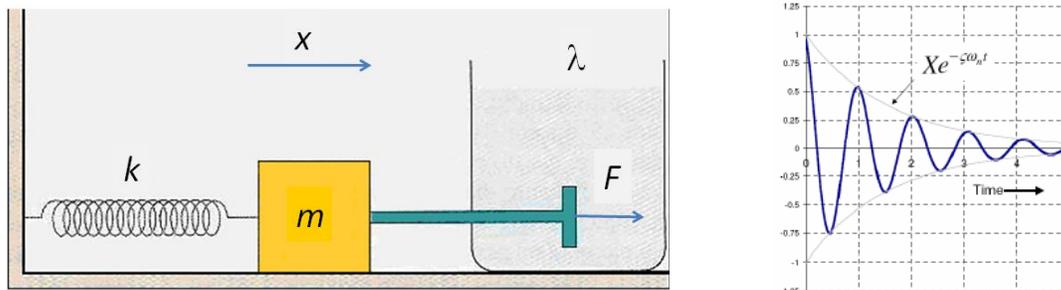


Fig. 1 - Modello sistema meccanico e oscillazioni libere smorzate

Il sistema meccanico sollecitato con una forza esterna momentanea e poi lasciato libero vibra in modo armonico smorzato con una frequenza naturale tipica che dipende dalle tre costanti k , λ ed m . Questa frequenza è detta frequenza propria o di risonanza del sistema. Una lama di seghetto bloccata su una morsa, caricata elasticamente e poi lasciata libera evidenzia quanto descritto. L'energia in gioco corrisponde al lavoro fatto per caricare inizialmente la molla (lama seghetto) che viene restituito in forma cinetica con le oscillazioni e in calore con l'attrito di smorzamento.

Se invece di una forza esterna momentanea si applica una forza periodica continua si ha una oscillazione forzata di frequenza pari a quella di sollecitazione e di ampiezza tanto maggiore quanto più ci si avvicina alla frequenza propria di risonanza. Alla frequenza di risonanza si ha il massimo trasferimento di energia dalla forza esterna al sistema meccanico. Se si usa una forza periodica con frequenza pari a quella di risonanza l'ampiezza delle oscillazioni può rompere il sistema meccanico.

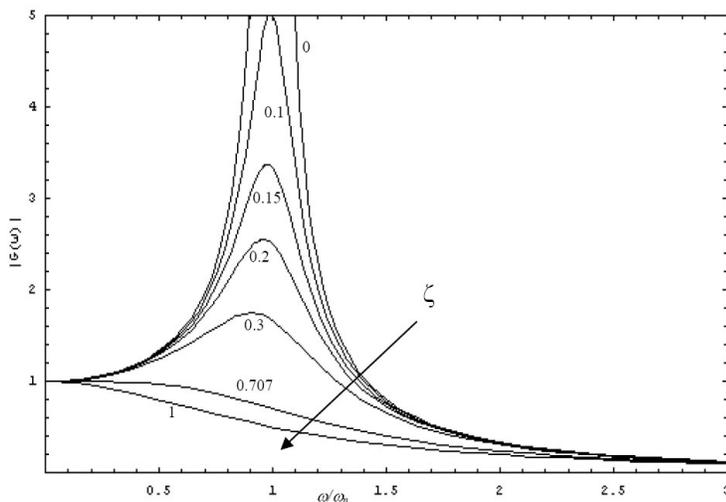


Fig. 2 - Ampiezza oscillazioni forzate in funzione della frequenza di sollecitazione

Nella figura 2 in ascissa è riportato il rapporto fra la frequenza di sollecitazione e quella di risonanza e in ordinata l'ampiezza delle oscillazioni. Le varie curve si riferiscono a diversi tipi di ammortizzatore. Si vede che alla frequenza di risonanza, ascissa uguale a 1, le ampiezze si esaltano sempre di più in funzione del tipo di ammortizzatore.

E' noto il caso di un ponte in ferro crollato sotto effetto del vento che aveva indotto una oscillazione forzata di frequenza pari a quella naturale di risonanza. Si può osservare su talune linee ad alta tensione la presenza

contrappesi in ferro in prossimità degli isolatori. I contrappesi sono aggiunti per cambiare la massa della campata al fine di evitare oscillazioni pericolose.

OSCILLATORE ELETTRICO LIBERO E FORZATO

L'equivalente elettrico del modello meccanico di oscillatore è il circuito RLC composto da una resistenza elettrica R , da una bobina L e da un condensatore C . I potenziali di ciascun elemento, in analogia alle forze del sistema meccanico sono:

1. potenziale di accumulo $V=q/C$ del condensatore con q carica accumulata e C capacità dello stesso
2. potenziale dissipativo $V= Ri$ della resistenza elettrica di valore R percorsa dalla corrente i
3. potenziale cinetico $V=L\Delta i/\Delta t$ della bobina di induttanza L percorsa dalla corrente variabile $\Delta i/\Delta t$.

Il circuito di figura 3 è un esempio di generatore di oscillazione libera che si manifesta alimentandolo in corrente continua con una batteria. Il condensatore è una barriera isolante. Le cariche elettriche fluiscono dalla batteria alle piastre del condensatore ma nel loro migrare vengono fermate dalla controeazione magnetica della bobina che cessa quando le cariche si fermano. A quel punto il moto delle cariche riparte per riarrestarsi e così via fino ad arrivare alla condizione di equilibrio con la tensione della batteria uguale a quella ai capi del condensatore.

La condizione di equilibrio viene raggiunta in modo oscillatorio smorzato con una frequenza che è quella propria di risonanza del circuito RLC. Nel grafico la linea blu è la tensione della batteria mentre le oscillazioni rosse rappresentano la tensione ai capi del condensatore. Raggiunto l'equilibrio nel circuito non circola più alcuna corrente. Commutando l'interruttore nella posizione 2 la carica accumulata sulle piastre del condensatore viene liberata arrivando, sempre in modo oscillatorio smorzato, ad una nuova situazione di equilibrio con potenziale nullo ai capi del condensatore.

La frequenza delle oscillazioni libere smorzate è la frequenza propria di risonanza del circuito RLC che dipende unicamente dalle caratteristiche costruttive dei tre elementi.

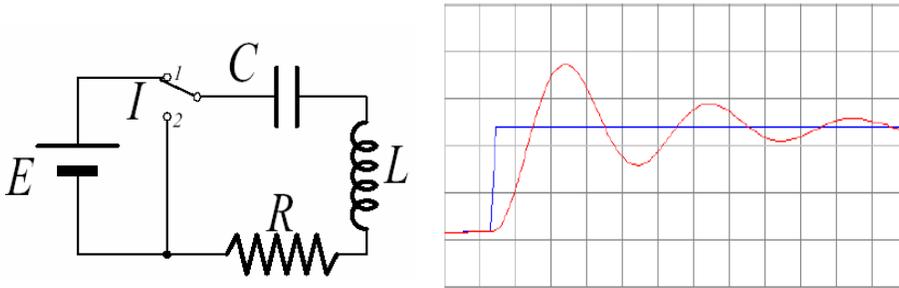


Fig. 3 - Modello sistema elettrico RLC con oscillazioni libere smorzate

Lo stesso circuito alimentato in corrente alternata come in figura 4 è sede di oscillazioni forzate alla frequenza del generatore. Nonostante la barriera isolante rappresentata dal condensatore ora nel circuito circola sempre corrente perché il generatore elettrico inverte continuamente la sua polarità. La corrente è un flusso di cariche elettriche indipendentemente dalla loro direzione di marcia continua o alternata come rappresentato dalla curva oscillante rossa di figura 4. L'intensità della corrente è tanto più alta quanto più la frequenza del generatore si avvicina a quella libera di risonanza come mostrato nelle due curve a destra di figura 4 che hanno il massimo sulla frequenza f_R di risonanza.

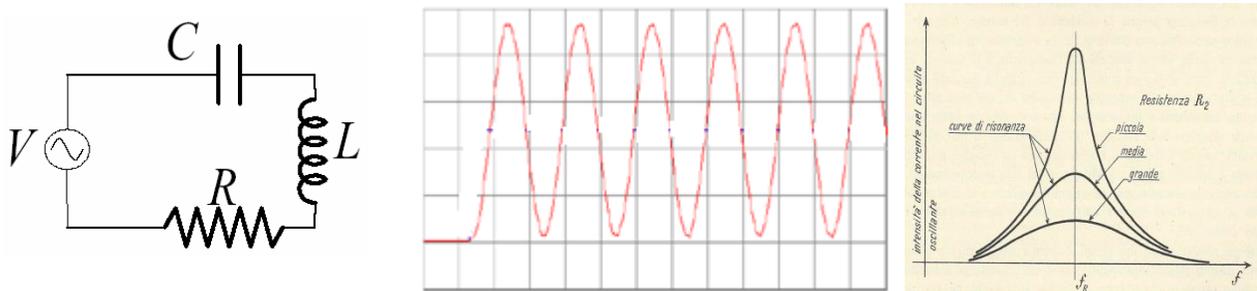


Fig. 4 - Circuito RLC con oscillazioni forzate con curve della intensità di corrente in funzione della frequenza del generatore

E' istruttivo ora evidenziare le analogie fra oscillatori meccanici e elettrici scrivendo le equazioni delle forze che regolano il moto del primo e delle tensioni che regolano la corrente nel secondo.

$$F(t) = ma + \lambda v + kx \quad \text{equazione del moto con le forze in gioco nel sistema meccanico}$$

$$V(t) = L\Delta i/\Delta t + Ri + q/C \quad \text{equazione correnti con i potenziali in gioco nel sistema elettrico}$$

Una bobina L si comporta come una massa m , una resistenza R come un ammortizzatore λ e un condensatore C come una molla k . L'oscillazione $\Delta i/\Delta t$ corrisponde ad una accelerazione a , la corrente i alla velocità v e la carica elettrica q alla deformazione elastica x .

OSCILLATORI IN ALTA FREQUENZA

Una delle applicazioni fondamentali degli oscillatori RLC è la generazione di oscillazioni elettriche ad alta frequenza per trasmissioni radio. Si tratta di mantenere nel tempo le oscillazioni libere di corrente alla frequenza naturale di risonanza di un circuito RLC. Per fare questo bisogna dare un apporto esterno di energia ad ogni ciclo per compensare le inevitabili perdite dissipative di smorzamento delle oscillazioni.

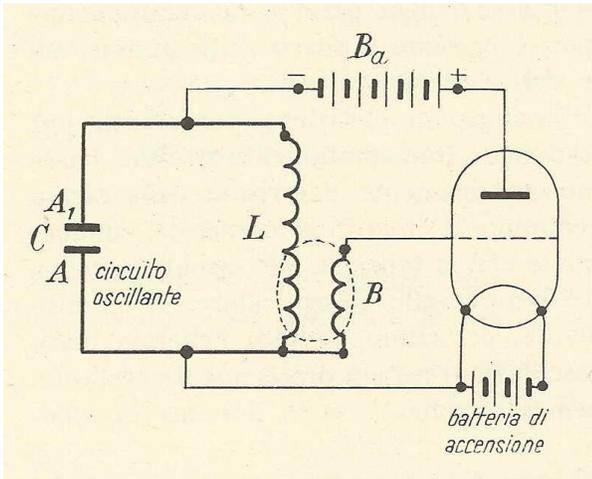
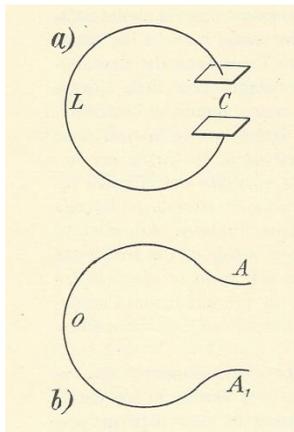


Fig. 5 - Oscillatore elettronico

L'oscillatore di figura 5 è un circuito RLC senza la resistenza R che è influente per i discorsi che faremo. Il circuito è simile a quello della figura 3 con una valvola elettronica al posto dell'interruttore e un accoppiamento induttivo B che preleva un segnale variabile dall'induttanza L per trasferirlo sulla griglia della valvola. La valvola diventa così un interruttore, che si apre e chiude in modo sincronizzato con le oscillazioni del circuito, per fornire ciclicamente al circuito energia della batteria.



Ricordando che la frequenza f_R di risonanza dipende dalla radice dell'inverso del prodotto LC consegue che in alta frequenza bisogna avere capacità e induttanze molto piccole. La bobina può ridursi così anche ad una sola spira e il condensatore avere piastre molto piccole come nella figura 6a qui a fianco. Più spesso uno spezzone di filo ricurvo come in figura 6b può essere un circuito LC. Si passa infine ad un pezzo di filo dritto, detto dipolo, che assolve il compito di circuito oscillante a induttanza e capacità distribuita come nella figura 7.

Fig. 6 - Circuiti LC in alta frequenza

Nel dipolo 7a il filo è un condensatore con le cariche positive in alto e quelle negative in basso. L'oscillazione porta all'inversione delle cariche come in figura 7c passando attraverso lo stato 7b che rappresenta una induttanza percorsa dalla corrente di spostamento delle cariche I_M .

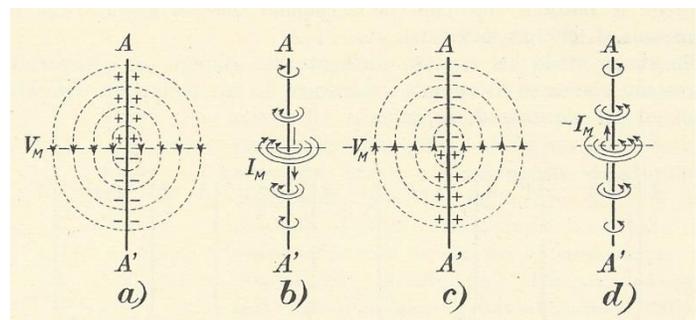


Fig. 7 - Dipolo elettrico

Se nell'oscillatore descritto in figura 5 sostituiamo al posto della bobina L e del condensatore C un dipolo otteniamo un trasmettitore radio che irradia nello spazio onde elettromagnetiche provocate dalle oscillazione ad alta frequenza delle cariche elettriche nel dipolo.

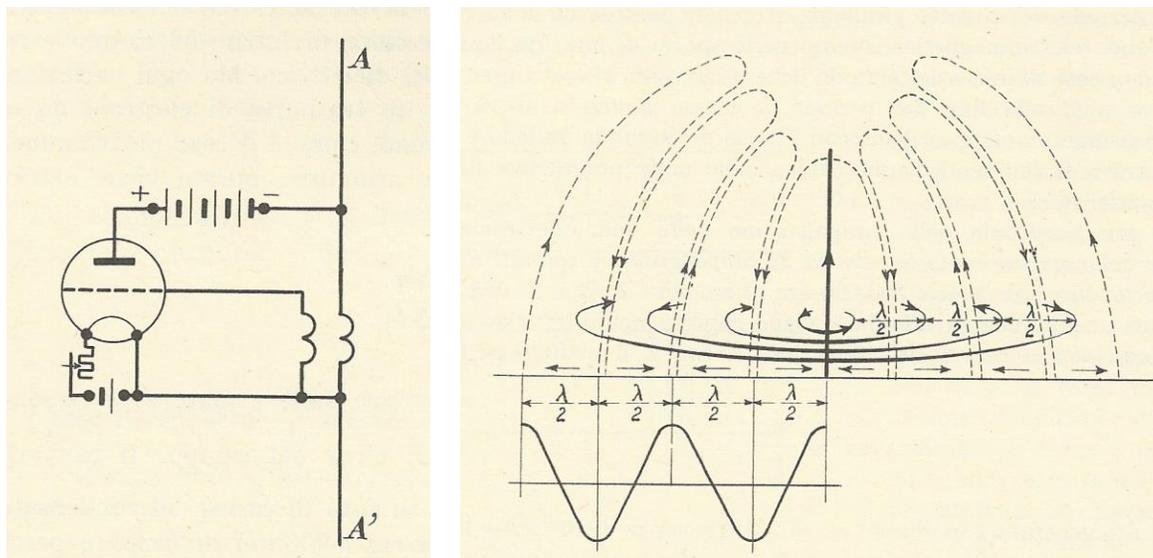


Fig. 8 - Trasmettitore radio e onda irradiata da una antenna verticale

ONDE ELETTROMAGNETICHE

Il dipolo elettrico oscillante è la sorgente generatrice di onde elettromagnetiche come la corda oscillante di uno strumento musicale è la sorgente di onde acustiche che arrivano al nostro timpano come suoni. Le onde acustiche si propagano nell'aria e non nel vuoto, le onde elettromagnetiche si propagano anche nel vuoto.

<i>trasporto di energia a mezzo onde</i>			
<i>tipo onda</i>	<i>sorgente onda</i>	<i>mezzo di trasporto</i>	<i>effetto a distanza</i>
marina	vento	acqua	erosione scogliera
sonora	corda vibrante	aria	vibrazione timpano auricolare
radio	dipolo oscillante	campo elettromagnetico	vibrazione indotta su dipolo elettrico
luminosa	salto quantico	fotone	eccitazione fotoricettori retina

Tutti i tipi di onde trasportano energia dalla sorgente al rilevatore tramite un mezzo di trasporto come evidenziato dagli esempi della tabella. Poiché le onde radio e la luce si propagano anche nel vuoto sono stati introdotti i modelli concettuali di campo elettromagnetico e di fotone quali mezzi di trasporto non materiali.

Il campo è una porzione di spazio fisico dove sia rilevabile la presenza di una forza elettrica o magnetica. Il campo è un modello matematico vettoriale con linee di flusso atte ad indicare la

direzione della forza riscontrabile qualora si introducesse in quel punto una carica elettrica o un dipolo magnetico (figura 9).

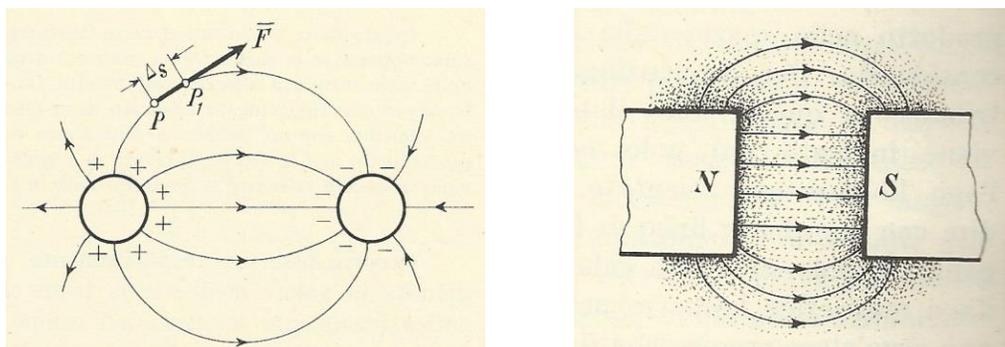


Fig. 9 - Linee di flusso del campo elettrico fra due cariche e del campo magnetico fra due poli

Sperimentalmente si rileva che un magnete oscillante, come una calamita rotante, posto davanti ad un conduttore ad anello, genera una corrente elettrica oscillante sul filo conduttore (Legge di Faraday-Henry)¹. Parimenti una corrente oscillante su un conduttore ad anello genera del magnetismo oscillante attorno al conduttore stesso (Legge di Ampere-Maxwell)².

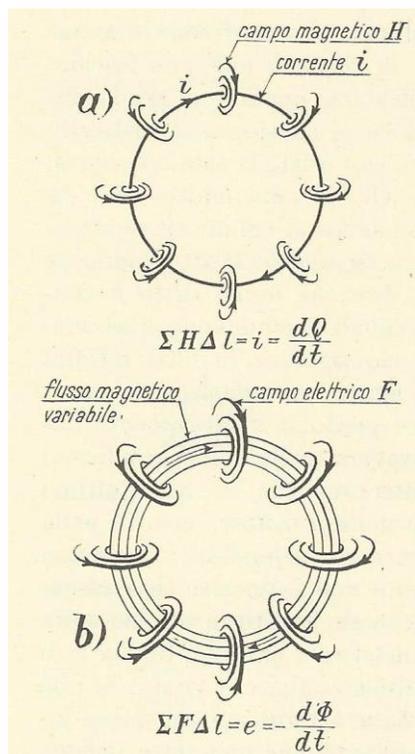


Fig. 10 - Leggi del campo magnetico e del campo elettrico

Una corrente elettrica è un flusso di cariche, elettroni o ioni, in movimento spinti da una forza elettrostatica (tensione elettrica) che può essere rappresentata da un campo elettrico. Il salto concettuale da fare ora, rispetto alle evidenze sperimentali appena descritte, è immaginare il conduttore elettrico e la calamita inesistenti e sostituiti rispettivamente dai corrispondenti campi elettrici e campi magnetici oscillanti. Dobbiamo fare questa astrazione perché nel vuoto non c'è materia e ciò nonostante le onde elettromagnetiche si propagano trasportandovi energia.

La legge di Faraday-Henry dice così che un campo magnetico oscillante genera nello spazio circostante un campo elettrico oscillante con linee di flusso simili a quelle della ipotetica corrente che circolerebbe se vi fosse l'anello conduttore (figura 10 b). Parimenti la legge di Ampere-Maxwell dice che un campo elettrico oscillante genera nello spazio un campo magnetico oscillante equivalente a quello dovuto ad una ipotetica corrente che circolerebbe se vi fosse l'anello conduttore (figura 10 a).

Supponiamo di accendere per un brevissimo istante il dipolo di figura 8. L'oscillazione delle cariche elettriche nel dipolo genera

¹ Principio di funzionamento dell'alternatore

² Principio di funzionamento dell'elettro serratura cancello

un campo magnetico oscillante nell'intorno dell'antenna verticale prima di spegnersi. A sua volta il campo magnetico oscillante indotto genera nel suo intorno, spostato un po' dall'antenna, un nuovo campo elettrico oscillante prima di spegnersi a sua volta. Di intorno in intorno avremo un susseguirsi di campi elettrici e magnetici oscillanti che via via si allontanano dal dipolo antenna per irradiarsi nello spazio alla guisa di una buccia di cipolla come in figura 8.

Di fatto per effetto delle due leggi di Faraday-Henry e di Ampere-Maxwell i due campi non possono coesistere insieme come influsso reciproco; la variazione del campo elettrico induce un campo magnetico variabile che a sua volta induce un campo elettrico variabile e così via in una sorta di danza, l'uno producendo l'altro mentre si propagano innanzi attraverso lo spazio. Questa è l'onda elettromagnetica che trasporta l'energia, spesa per far oscillare inizialmente l'antenna, come energia potenziale dei campi associati anche attraverso il vuoto privo di materia. Tale energia viene poi utilizzata quando il campo elettromagnetico intercetta materia atta a trasformarla in modo adeguato.

Ad esempio la luce del sole attraversa lo spazio siderale come onda elettromagnetica per riconvertirsi in energia termica quando arriva sulla terra e fa oscillare le molecole di aria, acqua e quanto altro. Parimenti l'onda radio emessa da un satellite artificiale attraversa lo spazio per riconvertirsi in energia elettrica quando sulla terra incontra la materia di una antenna sintonizzata. Rammentiamo che luce e onde radio sono sempre onde elettromagnetiche anche se per la luce è stato introdotto il concetto di fotone quale corpuscolo di massa nulla atto a spiegare taluni fenomeni sperimentali quali l'effetto fotoelettrico (dualità onda-particella della luce).

E' facilmente constatabile che la forza magnetica di una calamita, o quella di un pettine sui capelli elettrizzati, si esaurisce in pochi centimetri perché i corrispondenti campi magnetico ed elettrico decrescono con il quadrato della distanza dalla fonte. Così la forza attrattiva di una calamita si riduce di cento volte passando da un millimetro ad un centimetro di distanza dalla stessa. Questo spiega perché il traferro dei motori elettrici sia ridottissimo e l'accoppiamento degli avvolgimenti dei trasformatori molto stretto ai fini di una buona funzionalità della macchine.

Queste evidenze traggono spesso in inganno sulla fatto che l'onda elettromagnetico possa trasmettere a distanza teoricamente infinita una forza elettrica e una forza magnetica. Realmente campi elettrici e magnetici si esauriscono nello spazio di qualche centimetro salvo il fatto che, come già detto, ciascun campo oscillante prima di estinguersi ne induce uno nuovo della stessa forma spostato appena un po' come un'onda perturbativa che si propaga nello spazio.

RICEVITORE RADIO AM

Il ricevitore radio trasforma l'energia trasportata dall'onda elettromagnetica in energia elettrica atta a far funzionare l'elettrocalamita di un telegrafo morse o di una cuffia audio. I moderni telefonini cellulari o la televisione sono solo apparecchi estremamente evoluti funzionanti comunque su questi principi. La figura 11 mostra lo schema essenziale di un ricevitore radio in modulazione di ampiezza AM che ha segnato il primo passo dalla trasmissione morse a quella audio. Rammentiamo che RAI significa "Radio Audizioni Italiane".

L'antenna ricevente, in analogia a quella trasmittente di figura 8, può diventare un dipolo elettrico oscillante, ovvero un conduttore di corrente elettrica verso terra, se l'onda elettromagnetica incidente non trova resistenza alla sua azione. Fra l'antenna e terra è interposto un circuito oscillante con induttanza L1 e capacità C1. Se la frequenza propria di risonanza di questo circuito coincide con la frequenza dell'onda elettromagnetica incidente allora la condizione di massimo trasferimento di energia è verificata e il campo elettromagnetico (energia potenziale immateriale) si trasforma in corrente elettrica (energia cinetica materiale).

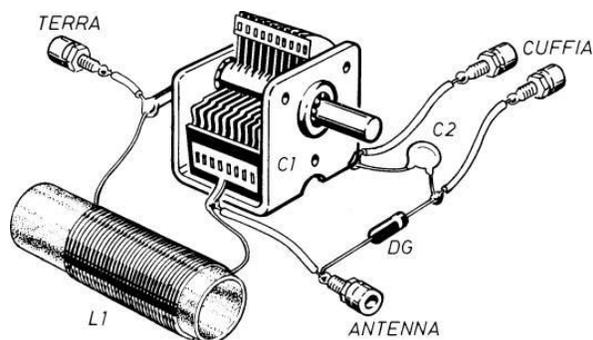
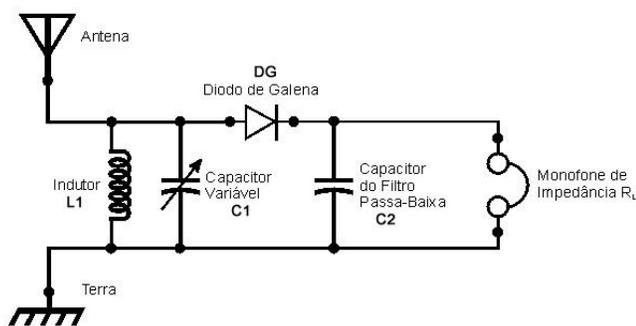


Fig. 11 - Primitivo ricevitore radio AM. Schema di principio e realizzazione con diodo al posto del cristallo di galena

Sempre con riferimento alla figura 11 il circuito L1-C1 assolve pertanto la funzione di filtro a tutte le onde elettromagnetiche incidenti l'antenna lasciando passare solo quella che è in sintonia con la sua frequenza di risonanza. Il condensatore C1 con la manopola per variare la sua capacità fa cambiare la frequenza di risonanza al circuito consentendo la sintonizzazione su altre onde elettromagnetiche. Il segnale radio così sintonizzato è una corrente elettrica oscillante ad alta frequenza che attraversa il diodo rivelatore DG per arrivare, epurata di alcune sue parti, alla cuffia audio di riproduzione meccanica.

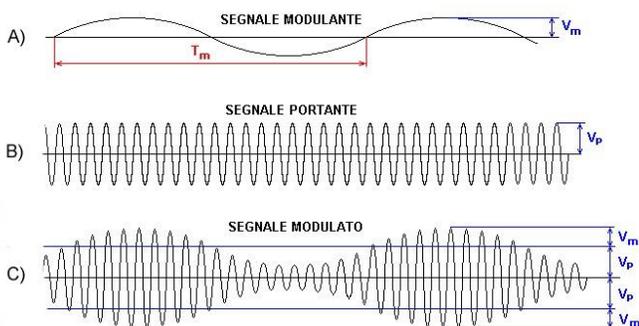


Fig. 12 - Modulazione di ampiezza AM per trasmissioni radio



Fig. 13 - Radio a galena anni "20

Per spiegare la funzionalità del rivelatore DG e del filtro passa basso C2 dobbiamo entrare nel merito della modalità di trasmissione radio in modulazione di ampiezza AM. Spiegheremo più avanti perché le onde radio debbano essere ad alta frequenza, tipicamente alcune centinaia di KHZ per le trasmissioni in onde medie. La voce umana è invece trasformabile da un microfono in un segnale elettrico di qualche migliaio di Hz. Si procede allora alla sovrapposizione del segnale audio modulante con il segnale radio ad alta frequenza, denominato segnale portante, come mostrato nelle figure 12. Il segnale modulato risultante viene così trasmesso e poi rivelato dall'apparecchio ricevente.

Con riferimento alla figura 11 il diodo DG elimina la parte negativa del segnale di figura 12c. Il condensatore C2 come filtro passa basso cortocircuita verso massa la rimanente oscillazione ad alta frequenza per consegnare alla cuffia il segnale audio originale di figura 12a. Il diodo DG è un cristallo di galena (solfuro di piombo) che come altri cristalli ha la proprietà di lasciar passare la corrente in un solo verso. Il verso del diodo così costituito non è fissato e si deve periodicamente spostare il punto di contatto perché il cristallo perde la conduzione. Il rivelatore a galena della radio di figura 13 mostra la rotellina di aggiustamento del contatto.

Durante la seconda guerra mondiale alcuni ingegnosi scoprirono che si poteva assemblare una radio a galena con una bobina in fil di ferro "di recupero", una lametta da barba arrugginita ed una mina di matita come diodo. Facendo scorrere la grafite dai punti meno arrugginiti a quelli più ossidati formavano quel che si chiama un diodo a punto di contatto. In tal modo si poteva sentire il segnale "rettificato" negli auricolari della radio a galena di fortuna. Le trasmissioni della BBC sulle sorti della guerra venivano ascoltate in questo modo dopo la confisca delle radio riceventi civili da parte dei nazisti. Anche nei campi di concentramento si costruirono radio di questo tipo.

SULLE ONDE RADIO

La velocità di propagazione di qualsiasi onda è data dal prodotto della lunghezza d'onda per la sua frequenza. Per le onde radio è ben noto che la velocità di propagazione è quella della luce di 300.000 km/s. Da questo discende che se RAI1 in onde medie trasmette da Monte Venda sulla frequenza di 936 kHz dobbiamo associare una lunghezza d'onda di 321 metri. L'antenna trasmittente trasforma un segnale elettrico in un'onda elettromagnetica; il più semplice tipo di antenna è il dipolo (figura 8) che con la sua elementare forma facilita anche la relativa trattazione matematica che viene spesso usata come termine di paragone per tutti gli altri tipi di antenne.

In base a questi modelli matematici si trova che la massima efficienza dell'antenna a dipolo si ha quando la sua dimensione è pari mezza lunghezza d'onda. L'antenna RAI1 AM Monte Venda dovrebbe pertanto essere lunga 160 metri e mezzo. Oggi vi sono tecniche più elaborate per costruire le antenne ma, agli albori, si disponevano due alti tralicci distanziati fra loro di mezza lunghezza d'onda atti a sorreggere il dipolo steso in orizzontale (figura 14). Giova ricordare che il nome antenna, di derivazione marinara, è il palo di legno trasversale posto in cima all'albero per sorreggere la vela quadra o latina. Il termine fu introdotto da Guglielmo Marconi che aveva installato una primitiva radio trasmittente sulla sua nave Elettra.

Le onde radio agli albori spaziavano da alcune centinaia di kHz a qualche MHz ovvero con lunghezze d'onda fra qualche centinaio di metri e alcune decine di metri. Era importante crescere con la frequenza di oscillazione per avere onde elettromagnetiche più energetiche ma vi erano dei limiti tecnologici con l'elettronica del tempo. Oggi abbiamo i cellulari a 2700 MHz. Infatti secondo la descrizione quantistica della radiazione ad un'onda elettromagnetica è associata un valore preciso di energia che dipende dalla frequenza di oscillazione dell'onda secondo la nota relazione di Planck $E=hf$. I raggi X sono molto più energetici delle onde radar che a loro volta sono più energetiche delle onde radio lunghe.



Fig. 14 - Antenna onde medie RAI1 di Budrio (BO)

Conseguentemente la corsa a frequenze sempre più elevate nasce dalla necessità di ridurre la potenza delle radiotrasmittenti per coprire in atmosfera la stessa distanza. Ad esempio la stazione radio AM di Budrio (BO), voluta da Guglielmo Marconi, trasmetteva in onde medie con una potenza di 50 kW. Nello spazio vuoto siderale l'onda si propaga senza attenuazione ma risulta più che intuitivo che le molecole atmosferiche, anche se non sono antenne sintonizzate possano avere effetti

dissipativi sull'energia trasportata dall'onda elettromagnetica. La potenza di un trasmettitore per telefonia cellulare è ridotta a qualche watt. Ricordiamo pertanto che aumentando la frequenza di oscillazione aumenta la capacità di penetrazione in atmosfera e si riduce la potenza di trasmissione della radio.

Risulta a questo punto ovvio che una linea elettrica di trasporto energia con oscillazioni a 50 Hz non possa emanare onde radio significative. A 50 Hz la lunghezza d'onda è 6000 km. Un dipolo di questa lunghezza è impensabile e l'onda sarebbe così poco energetica da dissolversi in brevissimo spazio.

Da ultimo le onde radio ultracorte ad alta frequenza richiedono la portata ottica fra antenne trasmittenti e riceventi (trasmissione in linea retta) con capacità quasi nulla di superare ostacoli interposti. Per questo motivo le trasmissioni TV internazionali richiedono il rimbalzo con un satellite in orbita per superare la curvatura terrestre. Viceversa le onde medie e lunghe superano agevolmente gli ostacoli, compresa la curvatura terrestre, per effetti combinati di onda di superficie e di riflessione da ionosfera.

CENNI STORICI

Completiamo la nostra descrizione con il quadro temporale dei più famosi contributi che hanno condotto all'invenzione della radio.

Lagrange (1736-1813)	nel 1788 pubblica "Mecanique Analitique" (modello oscillatore mecc.)
Ampere (1775-1836)	negli annali 1820-1828 relaziona i suoi sviluppi sull'elettromagnetismo
Faraday (1791-1867)	nel 1831 scopre l'induzione elettromagnetica
Henry (1797-1878)	nel 1832 realizza il primo motore elettrico
Maxwell (1831-1879)	nel 1864 pubblica le equazioni del campo elettromagnetico
Hertz (1857-1894)	nel 1885 scopre le onde elettromagnetiche predette da Maxwell
Marconi (1874-1937)	nel 1895 sperimenta la prima trasmissione radio in Italia. Anche Tesla in America e Popov in Russia avevano fatto esperimenti simili lo stesso anno

Le equazioni di Maxwell del 1864 definiscono il modello matematico di descrizione e unificazione di tutta la realtà sperimentale fatta fino ad allora nell'elettricità e nel magnetismo e spiegano la formazione delle onde elettromagnetiche che abbiamo cercato di descrivere in questi appunti. La teoria di Maxwell inoltre stabilisce che la velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica è quella della luce unificando definitivamente la natura della luce a quella delle onde radio.

Poiché dalla bibbia, Genesi 1-3, abbiamo la frase "Dio disse sia fatta la luce. E la luce fu", troviamo oggi in commercio delle magliette che riportano la frase biblica con la parola luce sostituita dalle equazioni di Maxwell in forma differenziale (figura 15). Nella foto ricordo, sempre di figura 15, lo scrivente riporta nella lavagna del suo ufficio le equazioni di Maxwell nella forma integrale. In questo modo presentiamo, per vostra conoscenza formale, le formule sintesi della complessa teoria unificatrice dei campi elettromagnetici.

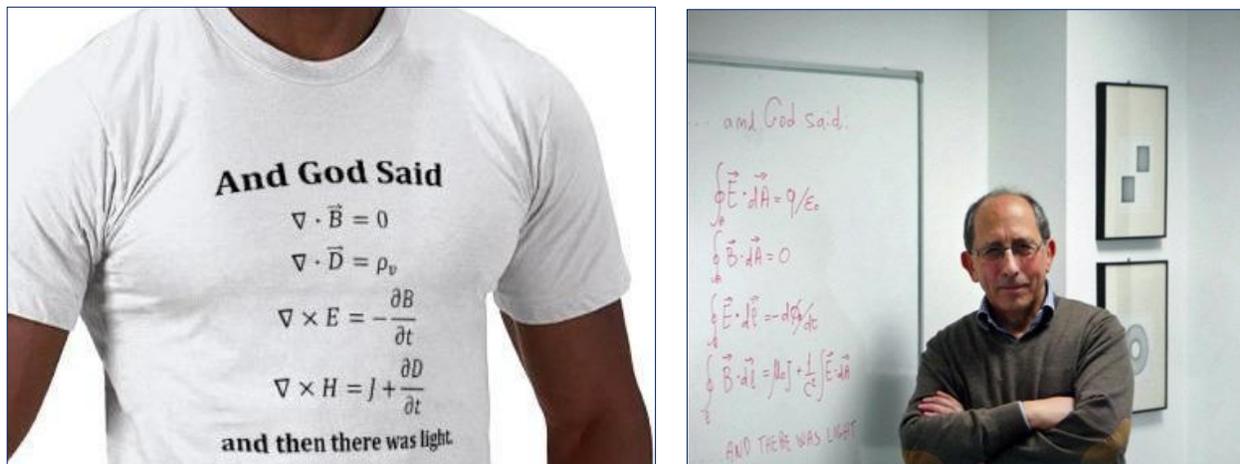


Fig. 15 - Equazioni di Maxwell in forma differenziale e integrale.