

# RISPOSTA IN FREQUENZA

## Introduzione storica

Il metodo di analisi e sintesi della *Risposta in Frequenza* nasce all'interno della sfera delle moderne telecomunicazioni.

La storia delle telecomunicazioni affonda nei tempi più lontani. La comunicazione a distanza si realizzò con segnali di fumo, l'accensione di fuochi e la percussione dei tamburi.

Su distanze minori, si riuscì a far viaggiare la voce lungo condotti metallici,

Ma la svolta giunse con la padronanza dell'energia elettrica.

1837. USA, Samuel **Morse** brevettò una sua versione del *telegrafo*.

6 gennaio 1838. Morse inviò il primo messaggio su una linea di 2 miglia. Fu la nascita del servizio telegrafico.

**Linea aerea:** un *solo filo*, con la *terra* come ritorno

Si coprono grandi distanze mediante la rigenerazione a relè.

1848 – 1850 (Siemens). Primi cavi telegrafici sotterrati.

1850. Primo cavo telegrafico sottomarino.

1856 – 1868. Primi cavi intercontinentali sottomarini per collegamento Usa – Europa.

**A. G. BELL** propose nel 1876, all'esposizione di Filadelfia, il **telefono** (brevettato lo stesso anno).

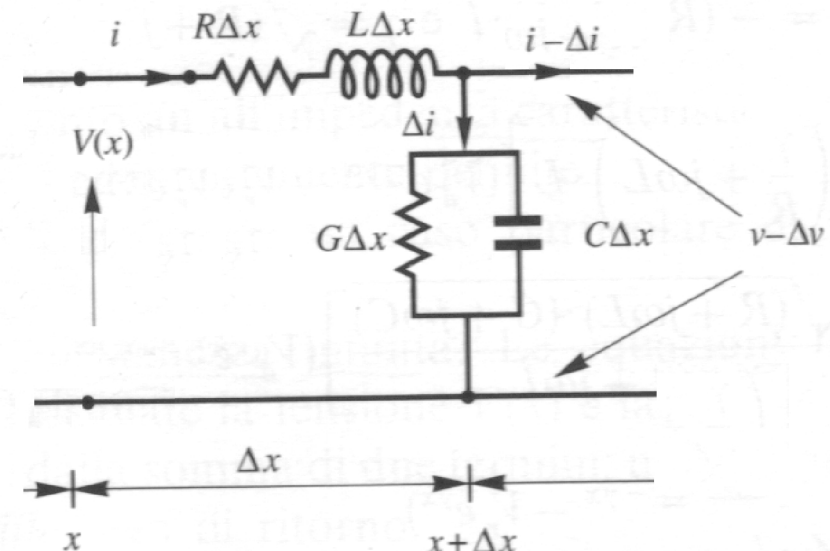
Le prime linee telefoniche erano strutturate come quelle telegrafiche: un filo per chiamare e ricevere. Il ritorno mediante la terra. Gli utenti parlavano e alternativamente ascoltavano, attraverso lo stesso 'buco'.

Nelle abitazioni la 'terra' del telefono era comune a quella del resto del circuito elettrico, con la conseguenza della presenza di molto rumore nel circuito telefonico.

Intanto l'esercizio della *linea telegrafica transatlantica* presenta seri problemi di affidabilità.

Nel 1881 **Oliver Heaviside**, fisico e matematico inglese, avviò uno studio sistematico sul funzionamento elettrico del cavo transatlantico: i segnali erano pesantemente attenuati, per di più in misura diversa alle diverse frequenze.

Egli descrisse la linea di trasmissione come una rete di elementi circuitali infinitamente piccoli (parametri longitudinali e trasversali). Nel 1887, applicando il suo '*calcolo operazionale*', scoprì la condizione che rendeva l'attenuazione lungo la linea indipendente dalla frequenza (**condizione di Heaviside:  $RC = GL$** ).



Una linea di trasmissione è tuttavia lontana dalla condizione di Heaviside in quanto risulta:

$$RC \gg GL$$

In particolare: linee aeree  $RC = 10 GL$

linee in cavo  $RC = 3500 GL$

L'avvicinamento alla *condizione di Heaviside* è teoricamente possibile con:

- diminuzione di R: *sconsigliato* per via dell'aumento della sezione del rame con conseguente aumento del costo del cavo;
- diminuzione di C: *sconsigliato* aumentare lo spessore del dielettrico, per minore manovrabilità del cavo e maggiori costi;
- aumento di G: *sconsigliato* per via dell'aumento delle perdite (corrente trasversale)
- aumento di L: *unica soluzione percorribile*.

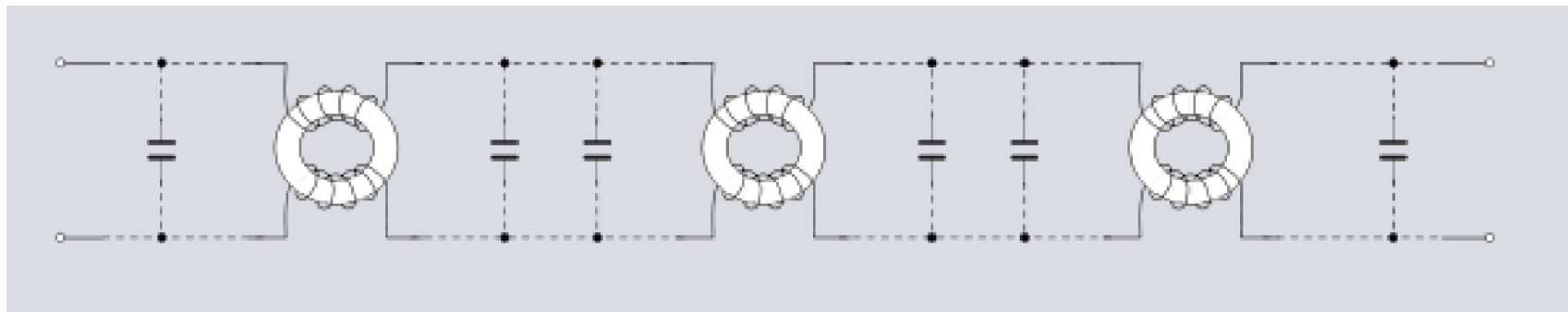
Nel **1893** Heaviside concluse che il modo migliore per alzare l'induttanza era quello di *aggiungere delle bobine a intervalli lungo la linea* (sia telegrafica che telefonica). Ma l'ambiente tecnico inglese non gli prestò la dovuta attenzione.

Lo studio di Heaviside ricevette la dovuta attenzione nei laboratori della AT&T, prima da John Stone, poi da George Campbell. Il 18 maggio **1900** viene costruita la *prima linea telefonica munita di bobine aggiuntive* (Jamaica Plain – West Newton in Boston).

Tuttavia l'aggiunta di bobine sulle linee era stata *brevettata* l'anno prima (1899) dal fisico serbo, emigrato negli USA, **Michael Pupin** (1858 – 1935). Per cui il successo della linea costruita dalla AT&T aprì più contenziosi legali:

- Heaviside, che non aveva brevettato nulla, rivendicò la paternità della soluzione con bobina, ma l'AT&T non intendeva riconoscergli nulla;
- l'AT&T non intendeva riconoscere nulla anche a Pupin, affermando che se di Pupin era il primo brevetto, sua era però la prima linea costruita in concreto.

Tuttavia l'AT&T temeva che la priorità delle pubblicazioni di Heaviside portasse al disconoscimento di tutti i brevetti, aprendo le porte alla concorrenza, per cui decise di arrivare a un compromesso con Pupin, acquistando il suo brevetto.



**Schematic of a balanced loaded line. The capacitors are shown connected with dotted lines to indicate that the capacitance is actually distributed along the line rather than the discrete elements shown. The windings of the loading coil are wound such that the magnetic flux induced in the core is in the same direction for both windings**

**1903.** Le compagnie telefoniche indipendenti raggiunsero i 2 000 000 di abbonati, contro il 1 278 000 del *Bell System*. Intorno al Bell System si consolidò l'immagine di compagnia che forniva un servizio costoso e di bassa qualità.

**1906.** **Lee De Forest** costruì, e brevettò, la **valvola di amplificazione elettronica (Triodo)** (presso la Western Electric di Chicago, area *Bell System*). I Bell Telephone Laboratories, della AT&T, valutarono la loro utilità per le linee telefoniche.

**1907.** Il banchiere **J. P. Morgan**, che disponeva del controllo finanziario del Bell System, decise di eliminare le compagnie indipendenti, acquistandole e accorrandole al Bell System, nell'intento di *fare della AT&T la sola compagnia telefonica Usa*.

**1911.** Una linea, amplificata con **amplificatori elettromeccanici (coppia altoparlante-microfono)** collegò New York con Denver (Colorado). Risultò evidente l'impossibilità di andare oltre per via dei limiti degli amplificatori.

**1913.** Il Dipartimento della Giustizia accusò l'AT&T di violare la *legge antitrust*. L'AT&T fermò la politica delle acquisizioni, ma nelle zone di sua influenza costrinse le compagnie indipendenti a pagare una tassa per l'uso delle linee sulle grandi distanze. Il Bell System arrivò a coprire l'83% degli abbonati, ma non più del 30% del territorio.

L'AT&T si decise ad acquistare il brevetto De Forest per sviluppare il '**triodo**'.

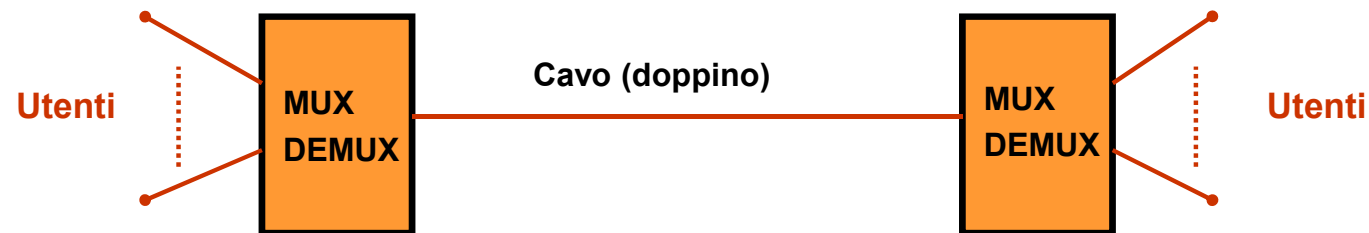
25 gennaio **1915.** Primo *collegamento continentale* New York – San Francisco, amplificato con **triodi (decisamente non lineari)**, e supportato con grosse bobine per ridurre l'attenuazione (che comportavano però anche un notevole calo della velocità di trasmissione).

In quegli anni aumentò notevolmente il numero degli abbonati. Un serio problema per la tecnologia dell'epoca, che permetteva una sola comunicazione per volta sulla linea. Per un servizio decente occorreva aumentare proporzionalmente il numero dei cavi telefonici.

Si sentiva il bisogno di un salto in avanti della tecnologia.

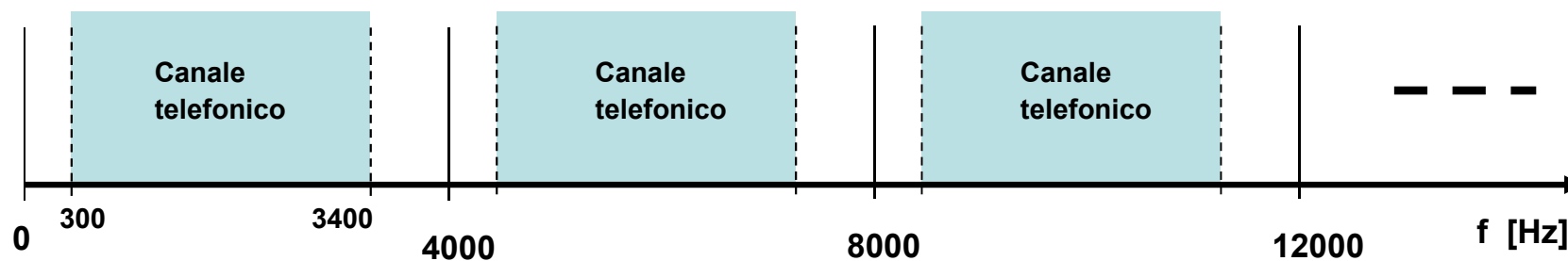
Nel **1918** la AT&T elaborò una nuova tecnica di trasmissione: la **FDM** (*Frequency Division Multiplexing*).

La tecnica consiste nel consentire più comunicazioni contemporaneamente, organizzando i canali telefonici su bande di frequenza diverse.



Il doppino telefonico ha una larghezza di banda che dipende dalla tecnologia, **qualche MHz**.

Un canale telefonico impegna una banda pari a **4 kHz**, ma il contenuto armonico del segnale voce è impoverito (minore) per consentire ai *filtri* di separare i canali.



**1921.** Harold Stephen **Black** (1893-1983), passato alla Western Electric Company, delineò le esigenze per la trasmissione di **migliaia di canali telefonici** su una linea continentale, in un momento in cui gli ingegneri della compagnia erano duramente impegnati nella messa a punto di *tre canali*.

Tra le esigenze principali Black prevede l'uso di 1000 amplificatori in cascata.

Black chiese di poter lavorare sugli amplificatori. Gli fu consentito a condizione di non interferire con il lavoro che già si svolgeva.

In quel periodo molti gruppi di ingegneri lavoravano per la **linearizzazione delle valvole** (anche ai Bell Laboratories): *tutti concentrati sul miglioramento del processo produttivo*.

**Anni '20.** Con l'**aumento del numero dei ripetitori** (triodi) si riuscì a ridurre le bobine, e così ad aumentare notevolmente la velocità di trasmissione, giungendo a *raddoppiare la larghezza di banda*.

Ma l'aumento dei ripetitori fece emergere un inaccettabile **aumento della distorsione** con conseguente degrado del segnale audio.

Inoltre la distorsione finiva per impedire anche un'efficace applicazione della FDM:

per brevi distanze e senza FDM, la piccola regione lineare dei triodi poteva essere sufficiente. Ma la messa in cascata di tanti amplificatori (per le lunghe distanze) o la presenza di canali adiacenti (FDM) rendevano le valvole inadeguate.

In un primo momento anche **Black** cercò un miglioramento della linearità dei triodi attraverso una più puntuale messa a punto del processo produttivo.

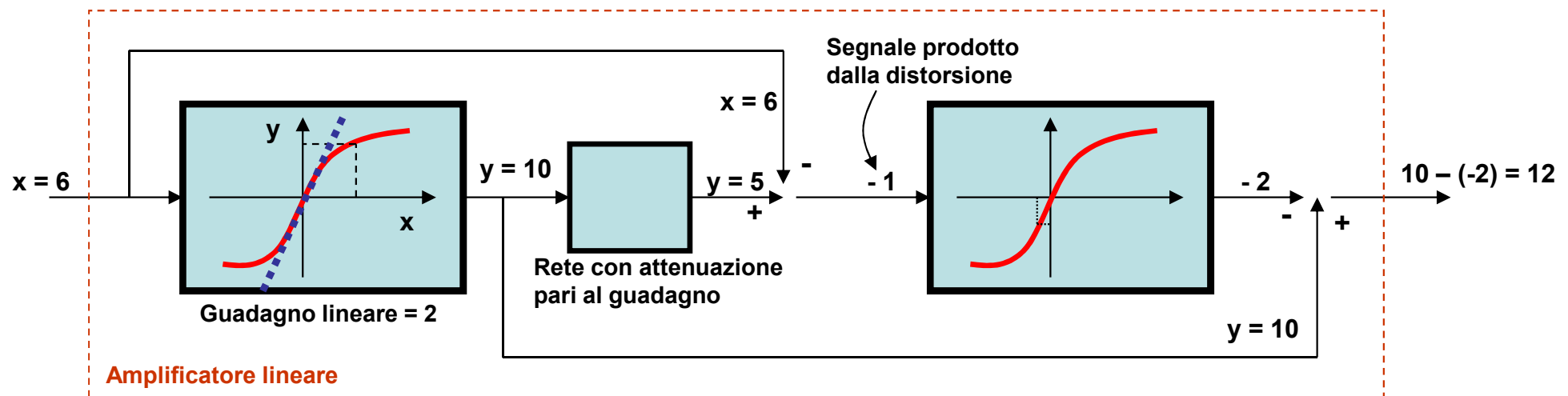
Ma i miglioramenti ottenuti sui triodi non furono sufficienti a risolvere il problema.

**NB:** molti anni dopo Black raccontò che ormai stava per mollare, quando il 16 marzo 1923 lesse un articolo di **C. P. Steinmetz**, ed fu colpito dal suo modo di porre i problemi. Ritornato a casa, ricominciò a studiare il problema dell'amplificazione da un nuovo punto di vista: *ciò che importava non era più la linearità intrinseca del triodo, ma l'assenza di distorsione in uscita dal triodo nell'ambito di un apparato non più composto dal solo triodo.*

Si trattava di accettare l'idea che l'amplificatore fosse intrinsecamente un apparato non lineare, e che

*"its output [was] composed of what was wanted plus what was not wanted".*

Molto velocemente Black formulò la soluzione. Entro marzo 1923 costruì il circuito.



Il collaudo confermò la validità del progetto.

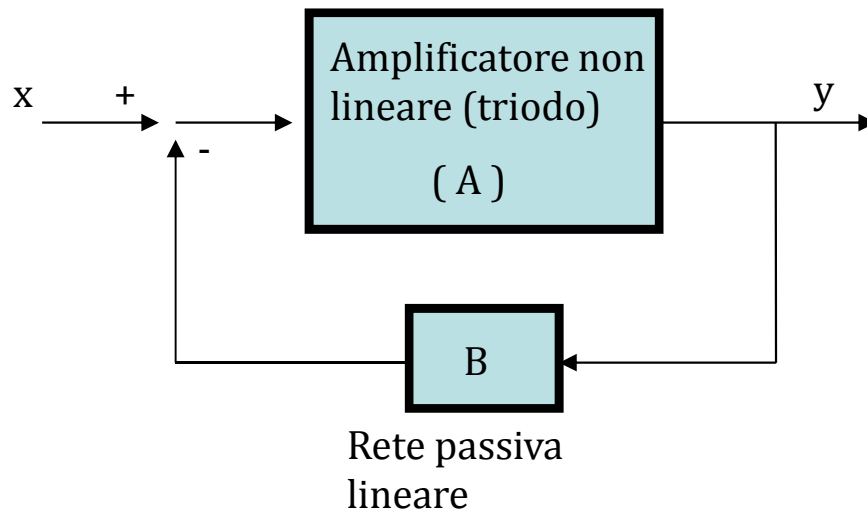
Tuttavia questo amplificatore *non era adatto per applicazioni generali*. Vi era bisogno di:

- un guadagno costante per ampi intervalli di frequenza
- una stabilità di tale guadagno per un lungo periodo.



Per diversi anni Black lottò col problema. La soluzione arrivò il 2 agosto 1927:

Black capì che riportando parte del segnale d'uscita al segnale d'ingresso in "reverse phase" (cioè sottraendolo) la distorsione poteva essere ridotta al valore desiderato, *a spese del guadagno dell'amplificatore*.



Considerando con guadagno  $A$  la parte lineare dell'amplificatore, il legame ingresso-uscita risulta:

$$y = \frac{A}{1 + A \cdot B} \cdot x$$

Black si rese conto che un alto guadagno d'anello  $A \cdot B$  ridimensionava di molto la dipendenza dell'uscita  $y$  dalle non linearità dell'amplificatore:

$$y \approx x \cdot \frac{1}{B}$$

Negli anni '20 altri studiosi stavano approfondendo il significato della **retroazione negativa**. Ma in generale **si tendeva a evitarla** per via della comparsa del fastidioso fischio, 'singing'.

Anche Black, cercando combinazioni migliori tra amplificatore non lineare e rete di retroazione constatò l'inspiegabile tendenza dell'apparato a produrre il fischio.

Nei **Bell Laboratories**, insieme a Black, lavorava **H. Nyquist** (1889 – 1976).

Nel **1932** Nyquist pubblicò "**Regeneration Theory**", in cui forniva una descrizione del funzionamento dell'amplificatore retroazionato, mediante:

- l'esame dell'apparato nel **dominio della frequenza** (metodo della **Risposta in Frequenza**)
- la formulazione di un criterio per esaminare la **stabilità** del *sistema retroazionato* esaminando la risposta in frequenza dell'*anello aperto*.

Il successo del metodo della risposta in frequenza fu dovuto al fatto che non si faceva alcun ricorso alla scrittura di equazioni differenziali, cioè ad un modello matematico difficile da scrivere e ancor più difficile da risolvere.

Le proprietà del sistema (amplificatore retroazionato) erano ricavate per *via empirica*, dove i risultati delle prove di laboratorio davano origine a grafici e solo in secondo ordine a modelli analitici nel dominio della frequenza.

Il successo del metodo della risposta in frequenza fu dovuto al fatto che, almeno inizialmente, fu un **metodo sperimentale**.