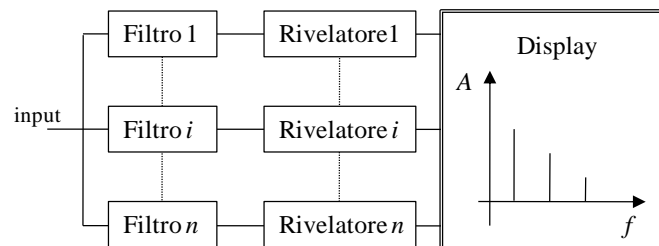


# Analizzatori di spettro

## 1 – Introduzione all'analisi spettrale

### Analisi spettrale in tempo reale

Da un punto di vista concettuale uno strumento atto ad effettuare l'analisi spettrale di un segnale può essere realizzato, come mostrato in Fig. 1.1, inviando il segnale in ingresso a  $n$  filtri passa banda, le cui bande passanti coprono l'intero campo delle frequenze di interesse. Le uscite di questi filtri vengono trattate con opportuni rivelatori per ottenere le ampiezze delle componenti spettrali, che vengono infine visualizzate proprio in funzione delle frequenze centrali delle bande dei filtri.



**Fig.1.1** – Schema di principio di un analizzatore di spettro con banco di filtri

Il vantaggio di questo schema è costituito dal fatto che tutte le componenti spettrali vengono valutate e visualizzate contemporaneamente. Questa caratteristica lo rende adatto per l'analisi di segnali con spettri tempo-varianti (segnali non stazionari) e per questo motivo esso viene chiamato analizzatore di spettro in tempo reale (*real-time spectrum analyzer*).

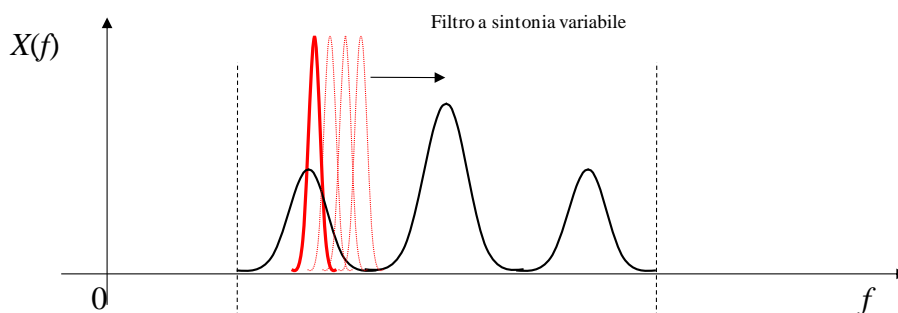
Il principale inconveniente è rappresentato dal fatto che, per ottenere una buona risoluzione in frequenza in una gamma di frequenze abbastanza ampia, occorrerebbe utilizzare un numero elevato di filtri con banda sufficientemente stretta.

Pertanto nell'ambito della strumentazione di misura l'implementazione analogica per la realizzazione di un analizzatore di spettro in tempo reale trova scarso impiego e ad essa viene preferita la soluzione digitale, basata sulla FFT, che verrà presentata nel paragrafo 3 di questo capitolo.

### Analisi spettrale con filtro a sintonia variabile

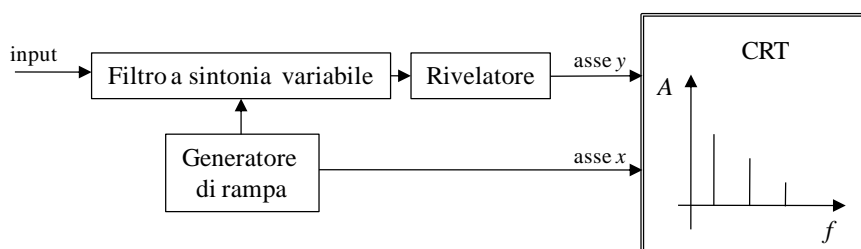
In presenza di segnali con spettro tempo-invariante (segnali stazionari o quasi stazionari) appare più opportuno scandire l'intero spettro del segnale da analizzare mediante un unico filtro opportunamente accordato (*sweep tuned spectrum analyzer*).

Una prima soluzione potrebbe essere rappresentata da un filtro la cui sintonia può essere variata elettronicamente mediante un comando in tensione (Fig. 1.2).



**Fig.1.2** – Filtro a sintonia variabile

La sintonia del filtro viene regolata tramite un generatore di rampa, che può essere impiegato anche per comandare l'asse orizzontale di un dispositivo di visualizzazione, per esempio un tubo a raggi catodici del tipo di quelli usati per gli oscilloscopi analogici. L'uscita del filtro, opportunamente trattata per rivelarne l'ampiezza, può essere inviata sull'asse verticale dello stesso display, in modo da ottenere la desiderata visualizzazione dello spettro di ampiezza (Fig. 1.3).



**Fig.1.3** – Schema di principio di un analizzatore di spettro con filtro a sintonia variabile

Tale soluzione, che in linea di principio appare semplice, risulta però caratterizzata da diversi problemi di natura pratica.

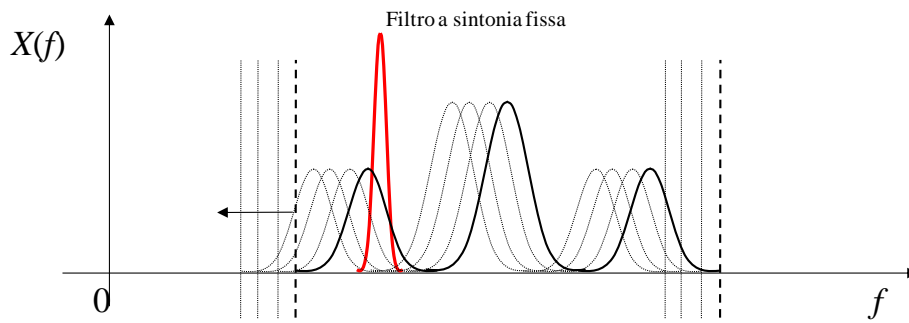
Infatti non è possibile realizzare un filtro a sintonia variabile con banda sufficientemente stretta su un'ampia gamma di frequenze e quindi si potrebbero ottenere solo gamme di frequenze limitate e con risoluzione non molto stretta. Inoltre, poiché la larghezza di banda del filtro dipende dalla sua frequenza centrale, la risoluzione in frequenza dell'analisi non sarebbe costante.

## 2 – Analizzatore di spettro a supereterodina

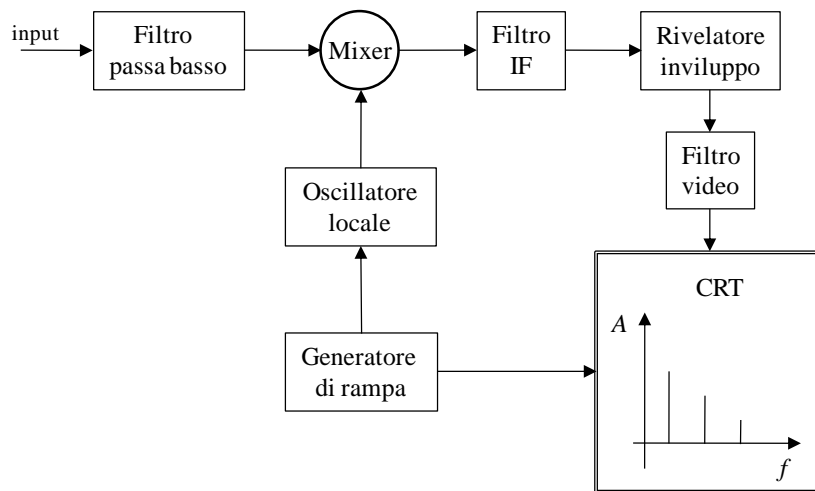
### Schema di funzionamento

La soluzione più comunemente impiegata per gli analizzatori di spettro *sweep tuned* consiste nel far scorrere lo spettro del segnale lungo l'asse delle frequenze, in modo che esso possa essere analizzato da un filtro passa banda a frequenza centrale fissa (Fig. 2.1).

Lo scorrimento dello spettro può essere ottenuto con la tecnica della supereterodina, cioè *mescolando* il segnale di ingresso con un segnale sinusoidale a frequenza variabile generato da un oscillatore locale (LO). La Fig. 2.2 mostra lo schema di un analizzatore di spettro basato su questo principio.

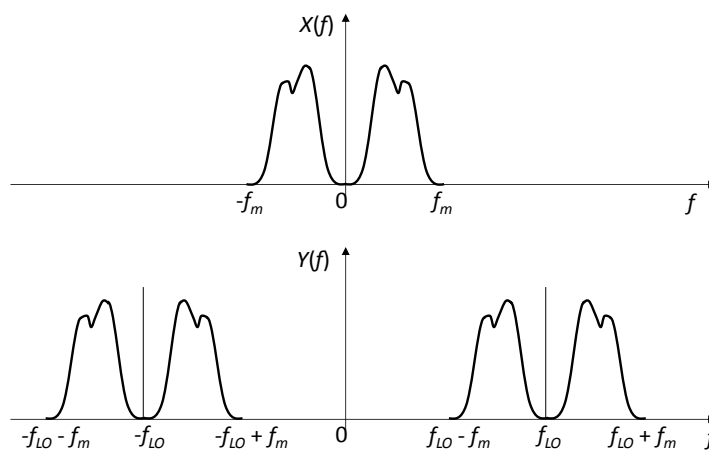


**Fig.2.1** – Filtro a sintonia fissa e scorrimento dello spettro



**Fig.2.2** – Analizzatore di spettro a supereterodina

Lo spettro  $X(f)$  del segnale di ingresso, passando nel *mixer*, viene traslato nell'asse delle frequenze di una quantità pari alla frequenza  $f_{LO}$  del segnale fornito dall'oscillatore locale, ottenendo all'uscita lo spettro  $Y(f) = X(f \pm f_{LO})$ . La Fig. 2.3 riporta gli spettri del segnale originario, che si ipotizza limitato superiormente dalla frequenza  $f_m$ , e di quello traslato.

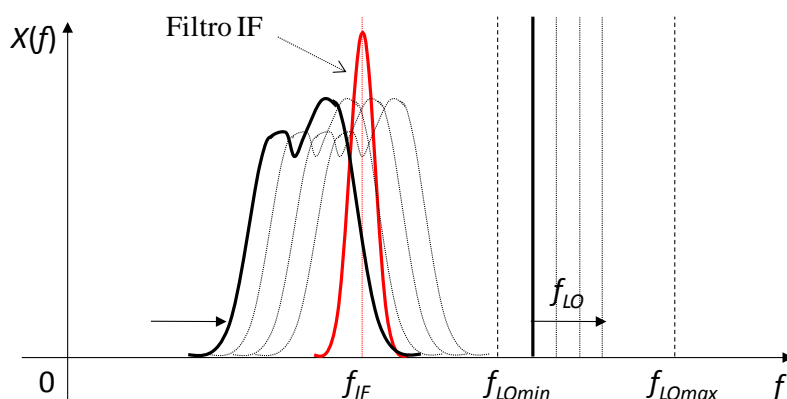


**Fig.2.3** – Spettro del segnale di ingresso,  $X(f)$ , e di uscita,  $Y(f)$ , del mixer

Il segnale così convertito viene inviato in ingresso a un filtro passa banda a frequenza intermedia (*Intermediate Frequency, IF*).

Se  $f_{in}$  è una frequenza contenuta nello spettro del segnale da analizzare, l'uscita del *mixer* conterrà le frequenze  $f_{LO} \pm f_{in}$ . Poiché la frequenza centrale del filtro intermedio,  $f_{IF}$ , è più piccola della minima frequenza generata dall'oscillatore locale,  $f_{LOmin}$ , le uniche componenti del segnale di ingresso che possono attraversare il filtro IF sono quelle la cui frequenza  $f_{in}$  è tale per cui la differenza  $f_{LO} - f_{in}$  ricade all'interno della banda passante del filtro stesso.

Al variare della frequenza  $f_{LO}$  questa condizione viene raggiunta, sequenzialmente, per le diverse componenti spettrali del segnale di ingresso (Fig. 2.4).



**Fig.2.4** – Scorrimento dello spettro del segnale e filtro a frequenza intermedia

In questo modo l'uscita del filtro IF costituisce un segnale la cui ampiezza, estratta da un rivelatore di involuppo, rappresenta lo spettro del segnale in ingresso.

È importante osservare che il filtro IF ha una frequenza centrale fissa e ciò rappresenta un evidente vantaggio rispetto alla soluzione con filtro a sintonia variabile. La sua larghezza di banda può invece essere variata a passi, al fine di conseguire il miglior compromesso tra risoluzione in frequenza e velocità della scansione, dal momento che, come verrà meglio analizzato in seguito, una banda passante più stretta comporta l'aumento del tempo totale della scansione.

In presenza di componenti spettrali ad alta frequenza nel segnale di ingresso, si potrebbe creare il problema delle cosiddette *frequenze immagine*. Infatti, in presenza di una frequenza  $f_{in}$  tale per cui  $f_{in} - f_{LO} = f_{IF}$ , tale componente attraverserebbe il filtro IF e verrebbe visualizzata nello schermo, come se facesse parte della porzione di spettro analizzata. Il filtro passa basso posto in ingresso allo strumento limita la banda del segnale applicato al mixer e consente quindi di risolvere questo inconveniente. La frequenza di taglio di questo filtro viene scelta più bassa della  $f_{IF}$  e più alta della massima frequenza che si desidera analizzare (banda dello strumento).

Il segnale in uscita al filtro IF è ulteriormente elaborato da un altro filtro passa basso (filtro video), che ha lo scopo di migliorarne la rappresentazione, e viene infine visualizzato in funzione della frequenza. L'impiego di opportuni amplificatori può consentire una visualizzazione su scala lineare o logaritmica.

Per la rappresentazione a schermo dello spettro in passato si impiegava un sistema basato su un tubo a raggi catodici, simile a quello visto per l'oscilloscopio analogico, inviando all'asse  $y$  il segnale in uscita dal filtro video e all'asse  $x$  la rampa di tensione che comanda la frequenza dell'oscillatore locale (Fig. 2.2).

Nelle realizzazioni più moderne il segnale analogico in uscita dal filtro video viene convertito in forma numerica e il tubo a raggi catodici viene sostituito da un display digitale, come negli oscilloscopi digitali. Un vantaggio di questa soluzione, oltre al miglioramento delle caratteristiche dello schermo, è rappresentato dalla possibilità di eseguire misure in modo automatico.

In alcune realizzazioni la digitalizzazione avviene all'uscita del rivelatore di involuppo e il filtro video è implementato in forma numerica.

Chiaramente la sequenzialità delle operazioni di scansione dello spettro non permette di analizzare simultaneamente tutte le componenti spettrali del segnale di ingresso. Questa configurazione pertanto non si presta ad analisi in tempo reale.

### **Risoluzione in frequenza e velocità di scansione**

I controlli presenti sul pannello dell'analizzatore di spettro permettono all'operatore di impostare l'ampiezza della gamma analizzata (*Frequency Span*), la durata della scansione e la larghezza di banda del filtro IF. I tre parametri devono però essere scelti in modo opportuno, se si vuole che la rappresentazione sia corretta.

La risposta del filtro IF è infatti tanto migliore quanto più ci si avvicina a una situazione quasi stazionaria, cioè quanto più lentamente viene eseguita la scansione di frequenza, in modo che l'uscita del filtro possa andare a regime per ogni valore della frequenza di scansione. Ciò è vero in particolare se si desidera una risoluzione in frequenza stretta, in quanto il funzionamento del filtro peggiora, in termini sia di valutazione dell'ampiezza della componente spettrale sia della sua corretta collocazione in frequenza, all'aumentare del rapporto tra la velocità della scansione e la banda passante del filtro IF. I tre parametri devono quindi essere impostati in modo tale che tale rapporto sia sufficientemente basso. Gli strumenti più recenti presentano un blocco che impedisce combinazioni non corrette.

### **Analizzatori a doppia conversione**

Talvolta è necessario avere una risoluzione in frequenza, e quindi una larghezza di banda del filtro IF, molto stretta, anche dell'ordine di decine di hertz. Selettività così spinte si possono realizzare solo con filtri a frequenza intermedia sufficientemente bassa e questo limiterebbe la banda complessiva dello strumento, che, per quanto visto prima, deve essere inferiore a  $f_{IF}$ .

Il problema si risolve con una doppia conversione di frequenza. Un primo convertitore ha un primo oscillatore locale con frequenza sintonizzabile. L'uscita di questo primo mixer passa in un primo filtro IF con scarsa selettività. L'uscita di questo filtro è inviata a un secondo mixer che lo mescola col segnale generato da un altro oscillatore locale, a frequenza fissa. L'uscita del secondo mixer diventa l'ingresso di un secondo filtro IF, la cui elevata selettività diventa la risoluzione in frequenza dell'intero strumento.

### **Prestazioni**

Il dato più importante per caratterizzare le prestazioni di un analizzatore di spettro è il campo di frequenze che il dispositivo consente di analizzare.

Il limite superiore nelle realizzazioni moderne raggiunge le diverse decine di gigahertz.

Il limite inferiore è condizionato dal fatto che, per consentire il funzionamento alle basse frequenze, la frequenza minima dell'oscillatore locale  $f_{LOmin}$  deve tendere a quella del filtro a frequenza intermedia  $f_{IF}$ . Al limite, per visualizzare anche la componente continua deve essere  $f_{LOmin} = f_{IF}$ , con la conseguenza che lo stesso segnale generato dall'oscillatore locale passa attraverso il filtro IF e viene quindi visualizzato, come se facesse parte dello spettro del

segnale in ingresso. Per questo motivo negli analizzatori di spettro commerciali più spesso la frequenza più bassa analizzabile varia da pochi hertz alle decine di kilohertz.

Altri aspetti di interesse sono:

- la risoluzione in frequenza (*Resolution Bandwidth, RBW*) che individua la capacità di distinguere due componenti spettrali prossime tra loro ed è determinata essenzialmente dalla banda passante del filtro IF (si è già osservato che una migliore RBW, cioè una banda passante più stretta, determina l'aumento del tempo totale della scansione);
- l'accuratezza delle misure di frequenza e di ampiezza, che può riguardare sia le misure assolute che quelle relative (ad esempio il valore di una componente armonica rispetto alla fondamentale);
- il *range dinamico*, che rappresenta la differenza tra il massimo e il minimo valore di ampiezza che lo strumento è in grado di misurare contemporaneamente;
- la sensibilità, limitata dalle diverse cause di rumore presenti;
- la distorsione, introdotta prevalentemente dal mixer.

La valutazione di questi parametri dipende da una molteplicità di fattori, a causa della complessità intrinseca dello strumento. Le specifiche fornite dai costruttori indicano spesso il valore di diversi parametri con riferimento ad alcune situazioni specifiche, dalle quali l'utente deve estrapolare le informazioni da applicare alla situazione reale della misura effettuata.

Ad esempio, il rumore viene definito mediante il *DANL (Displayed Average Noise Level)*, che rappresenta il livello medio del rumore visualizzato e fa riferimento alla minima RBW disponibile nello strumento, mentre la distorsione viene fornita mediante parametri quali il *TOI (Third Order Intercept)*, che rappresenta il valore del livello del segnale di ingresso per il quale la distorsione di terza armonica eguaglia il segnale stesso.

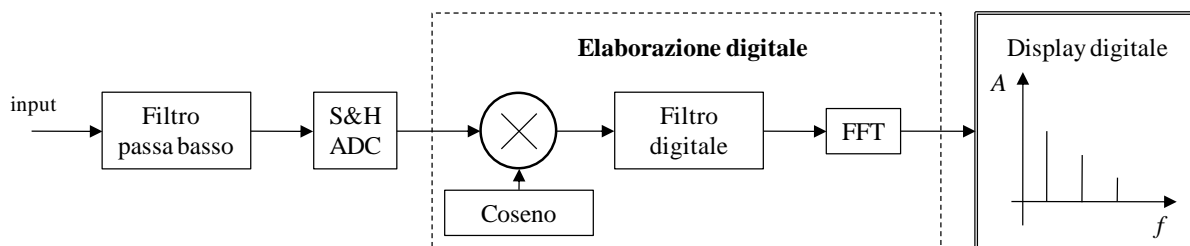
### 3 - Analizzatore di spettro FFT

L'analisi spettrale può essere effettuata campionando e convertendo il segnale in forma digitale con un sistema di acquisizione dati e applicando le normali tecniche di elaborazione numerica. Gli strumenti di misura realizzati secondo questo principio vengono detti *analizzatori di spettro FFT* (spesso identificati anche come *Dynamic Signal Analyzer, DSA*).

In questo caso valgono tutte le considerazioni fatte nel capitolo relativo all'analisi di segnali campionati.

Tuttavia tali considerazioni ipotizzano di valutare lo spettro del segnale dalla componente continua ( $f = 0$ ) fino alla frequenza massima  $f_{max}$ . In questo caso, come noto, la frequenza di campionamento  $f_s$  deve essere superiore al doppio di  $f_{max}$  e, se si desidera una risoluzione in frequenza pari a  $f_w$ , il tempo di osservazione deve essere pari a  $T_w = 1/f_w$ . Il numero di campioni acquisiti, che deve essere almeno pari a  $N = 2 \cdot f_{max} \cdot T_w$ , può risultare quindi particolarmente elevato e oneroso per l'elaboratore.

Se però si considera che in molti casi pratici lo spettro di interesse non parte dalla continua, ma è contenuto in un campo di frequenze  $f_{min} \div f_{max}$ , è utile moltiplicare in forma digitale il segnale acquisito con un segnale sinusoidale (numerico) di frequenza opportuna, in modo da traslare lo spettro in frequenza alle basse frequenze (Fig. 3.1). In pratica il principio è lo stesso della supereterodina, ma viene attuato in forma numerica anziché analogica.



**Fig.3.1** – Analizzatore di spettro FFT

Il segnale d'uscita dal mixer digitale passa attraverso un filtro digitale che ne effettua anche la decimazione, cioè dagli  $N$  campioni acquisiti crea un vettore  $M$  volte più piccolo, ottenendo ogni singolo valore come media di  $M$  campioni adiacenti. In tal modo è come se si fosse ridotta di  $M$  volte la frequenza di campionamento, con evidenti vantaggi in termini di oneri computazionali nell'applicazione della FFT. Nella visualizzazione del risultato la collocazione in frequenza tiene conto della frequenza del mixer digitale e della decimazione effettuata.

Evidentemente, se il segnale di ingresso comprende la componente continua non deve essere effettuata alcuna traslazione dello spettro.

Gli analizzatori a FFT coprono normalmente un campo di frequenza decisamente più basso di quelli a supereterodina, dell'ordine di alcune centinaia di kilohertz, risultando più adatti per fenomeni legati, p.es., all'acustica e allo studio di vibrazioni.

Per contro possono offrire diversi significativi vantaggi, tra i quali il principale è forse la possibilità di studiare anche fenomeni transitori, dovuta alla maggiore rapidità dell'analisi effettuata. Infatti la FFT agisce in pratica come un insieme di filtri in parallelo e quindi il suo funzionamento è riconducibile a quello di un analizzatore di spettro in tempo reale (Fig.1.1). Altri aspetti positivi sono rappresentati da una migliore risoluzione in frequenza e dal fatto che l'elaborazione digitale consente di estrarre informazioni relative anche alla fase delle componenti spettrali, che invece non era possibile ottenere con gli analizzatori a supereterodina.

E' infine da segnalare che diversi costruttori di strumentazione di misura offrono sul mercato anche analizzatori di spettro *ibridi*, nei quali, grazie ai progressi delle tecnologie dei convertitori AD e degli elaboratori digitali, la conversione del segnale in forma numerica avviene, con riferimento allo schema dell'analizzatore tradizionale illustrato in Fig.2.2 dopo aver applicato il principio della supereterodina per traslare lo spettro. In questo modo tutta l'elaborazione a frequenza intermedia avviene in forma digitale, anziché analogica, e ciò aumenta le prestazioni e la flessibilità del dispositivo, permettendo, per esempio, l'analisi mediante FFT. Questo approccio consente di associare all'elevata banda passante degli analizzatori di spettro tradizionali (fino alle decine di gigahertz) le migliori caratteristiche di velocità e risoluzione dell'analisi FFT.