



Capitolo 1

Analisi spettrale analogica e numerica

1.1 Introduzione

Le misure sui segnali rivestono sicuramente un ruolo fondamentale in tutti i campi di ricerca. Fondamentale è l’analisi dello spettro di un segnale, che consente di ricavare una serie d’informazioni difficili da ottenere nel dominio del tempo mediante l’uso di un semplice oscilloscopio.

Per comprendere l’importanza dell’analisi in frequenza di un segnale basta pensare al fatto che tutta la teoria delle telecomunicazioni si basa sulla trattazione dei segnali nel dominio della frequenza: posizione e ampiezza di una portante, larghezza di banda di un segnale modulato, quantità di rumore presente su un canale, distorsioni armoniche e di intermodulazione, sono soltanto alcune delle informazioni ricavabili dall’osservazione dello spettro di un segnale.

L’ambito delle radiofrequenze si inserisce perfettamente in questa panoramica, basta pensare all’attuale volume delle comunicazioni radiomobili, delle trasmissioni via satellite, o dei collegamenti via cavo ad alta velocità, e al fatto che questi sistemi si stiano muovendo verso frequenze di lavoro sempre più elevate, per rendersi conto dell’importanza della misura come strumento di verifica e validazione dei risultati ottenuti.



In quasi tutti i settori della scienza e della tecnologia occorre elaborare il segnale per facilitare l'estrazione dell'informazione, pertanto lo sviluppo di tecniche e sistemi di elaborazione del segnale è di grande importanza.

Spesso queste tecniche hanno come scopo la trasformazione del segnale in un altro segnale che, per qualche motivo, risulta più vantaggioso del segnale originale.

In seguito verranno analizzati gli aspetti più generali dell'analisi numerica con particolare attenzione alla trasformazione del segnale dal dominio del tempo a quello delle frequenze.

1.2 I segnali

I segnali sono variazioni di grandezze fisiche che trasportano informazioni.

Un segnale può essere definito come una funzione o una grandezza variabili nei confronti di una o più grandezze appartenenti ad un particolare dominio e contenente informazioni che riguardano in generale lo stato o il comportamento di un sistema fisico. Ad esempio il segnale può essere costituito dall'insieme delle variazioni di una grandezza nel tempo o nello spazio.

Matematicamente i segnali sono rappresentati come funzioni di una o più variabili. Per esempio un segnale vocale può essere rappresentato come un livello di pressione sonora funzione del tempo ed una fotografia può essere rappresentata come una livello di luminosità funzione di due variabili spaziali.



La variabile indipendente della rappresentazione matematica di un segnale può essere discreta o continua.

Esistono quindi due tipi di segnali: i segnali a tempo continuo e quelli a tempo discreto.

I primi sono segnali il cui andamento è descritto da una funzione continua definita su un insieme continuo. I secondi sono dei segnali in cui la variabile indipendente assume solo valori discreti sono in altre parole dei segnali che possono essere intesi come delle sequenze di numeri.

Oltre al fatto che le variabili indipendenti possono essere discrete o continue può inoltre accadere che anche il valore del segnale sia discreto o continuo. I segnali numerici (quelli che poi vengono elaborati da un processore) sono segnali discreti sia nel tempo (variabile indipendente) sia in ampiezza.

Le telecomunicazioni studiano la trasmissione di informazioni a distanza per mezzo di segnali che possono essere di vario tipo: acustico, elettrico, luminoso, elettromagnetico, ecc.

Esaminiamo, quale esempio, un sistema tipo di trasmissione telefonica.





L'uomo a sinistra, parlando, emette onde sonore che attraversano l'aria e colpiscono il microfono generando una corrente elettrica di forma del tutto analoga alle variazioni di pressione sonora prodotte nell'aria dalla sua voce.

Le centrali telefoniche possono essere collegate fra loro sia in fibra ottica che in ponte radio, come indicato in figura, pertanto il segnale deve adattarsi al mezzo trasmissivo e diviene dapprima segnale luminoso nella fibra ottica e, dopo, onda elettromagnetica fra l'una e l'altra antenna del ponte radio.

Inversamente, in ricezione, deve nuovamente riconvertirsi dapprima in segnale luminoso, poi in elettrico ed infine in sonoro per essere recepito dalla destinataria tramite il ricevitore telefonico.

Durante tutte queste conversioni da una natura all'altra, il segnale deve però mantenere sempre assolutamente costante l'unica cosa che veramente lo caratterizza: l'informazione che trasporta, perché è questa che il primo utente vuole comunicare al secondo utente senza, come è naturale, nessuna variazione.

Durante questa trasmissione, inoltre, il segnale, deve essere difeso da disturbi esterni, quali interferenze, rumore, diafonie, distorsioni, ecc. che ne altererebbero la forma e quindi l'informazione.



È necessario, quindi, uno studio accurato del segnale per individuarne tutte le caratteristiche informative in esso contenute, perché rimangano inalterate lungo la trasmissione fino a destinazione.

Il segnale può essere studiato dunque da due punti di vista diversi:

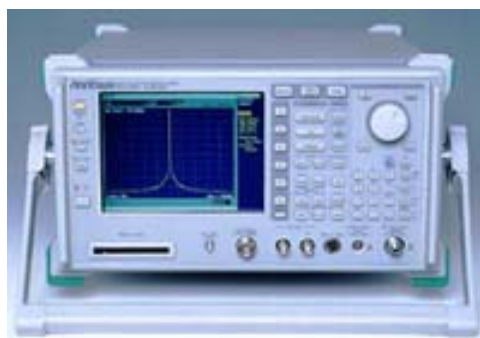
Nel dominio del tempo, attraverso la sua forma d'onda. Lo strumento idoneo per questo studio è l'oscilloscopio.



OSCILLOSCOPIO

Agilent 54833D 1 GHz Mixed-Signal Infiniium

Nel dominio della frequenza, attraverso il suo spettro. Lo strumento idoneo in questo caso è l'analizzatore di spettro.



ANALIZZATORE DI SPETTRO

Anritsu Model: MS2687B

1.3 Dominio del Tempo e Frequenza

Il modo tradizionale di osservare un segnale è visualizzarlo nel dominio del tempo.

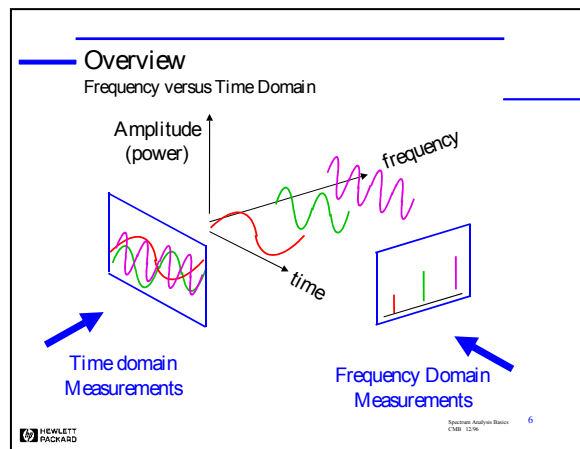
Il dominio del tempo possiamo vederlo come una sorta di “registrazione” di ciò che accade ad un parametro di un sistema nello scorrere del tempo.



Tipicamente è molto pratico convertire il parametro di interesse in un segnale elettrico tramite opportuni trasduttori. Tale segnale elettrico può essere allora registrato o visualizzato tramite magari un oscilloscopio.

Rappresentare i segnali nel dominio del tempo significa individuare e descrivere il loro andamento istante per istante. La variazione della forma d’onda in funzione del tempo può essere intesa come l’insieme dei punti dei valori assunti dall’ampiezza di una grandezza elettrica in ogni istante. Tali punti si chiamano “valori istantanei”

Il dominio della frequenza può sembrare a prima vista innaturale ma comunque è una parte importante della nostra vita quotidiana. Basti pensare all’accoppiata orecchio – cervello che costituisce un eccellente analizzatore di frequenza. Infatti tale sistema suddivide la banda audio in



molte bande limitate e determina la potenza presente in ciascuna banda. Può inoltre discriminare piccoli suoni immersi in un sottofondo rumoroso grazie alla sua capacità di analisi in tale dominio.

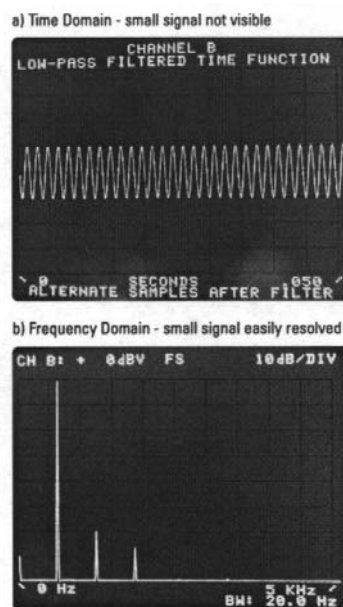
Pertanto il dominio della frequenza è abbastanza comune, ma non siamo abituati a visualizzarlo in maniera grafica.



E' importante sottolineare il fatto che non si perdono informazioni sul segnale passando da un dominio all'altro, ma lo si rappresenta solo in maniera differente.

La possibilità di avere una prospettiva diversa però risulta essere molto utile.

Supponiamo ad esempio di voler misurare il livello di distorsione in un oscillatore audio. In tal caso stiamo provando a individuare una piccola onda sinusoidale in presenza di un segnale molto più ampio.



I rispettivi domini (figure a lato) mostrano il segnale composto da un tono sinusoidale ed altre componenti sinusoidali sovrapposte (distorsioni). Quando queste componenti sono separate nel dominio della frequenza sono facilmente individuabili perché non sono più mascherate dalle altre più grandi.

1.4 Trasformata di Fourier

Jean Baptiste Joseph Fourier, matematico francese, nato nel 1768 ad Auxerre, e morto a Parigi nel 1830, dimostrò che una funzione periodica può essere espressa tramite una serie di funzioni trigonometriche secondo il teorema che prende il suo nome:



“Qualunque segnale periodico è

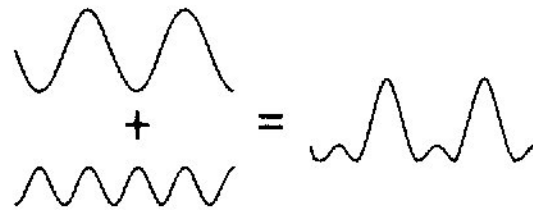
scomponibile nella somma di un eventuale

termine costante (valor medio) e di segnali

sinusoidali, dei quali uno ha la stessa

frequenza del segnale considerato (prima armonica o fondamentale) e gli altri hanno

frequenza multiple (armoniche superiori)”



Per comprendere meglio il teorema

di Fourier prendiamo in esame la

Figura a) accanto in cui i segnali

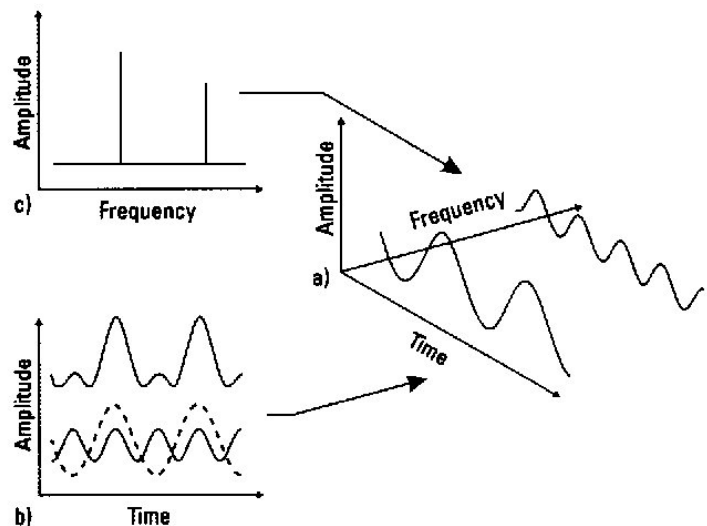
non sono rappresentati non su un

piano cartesiano ma in modo 3D,

introducendo l'asse delle frequenze.

In tal modo i segnali vengono

rappresentati nel loro sviluppo



temporale, ma posizionati sull'asse della frequenza, in corrispondenza del valore di questo

parametro. La proiezione di questi due segnali sul piano ampiezza frequenza darà

“spettro” del segnale in questione.

La Figura b) invece riporta la composizione dei due segnali nel piano ampiezza tempo in

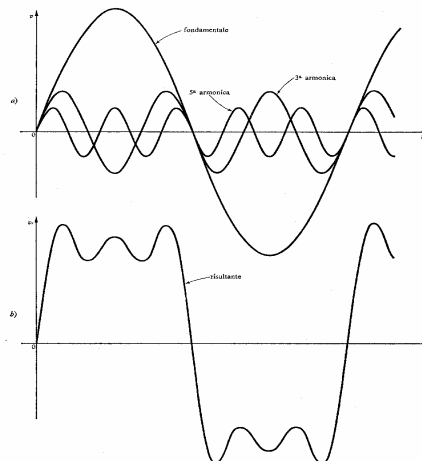
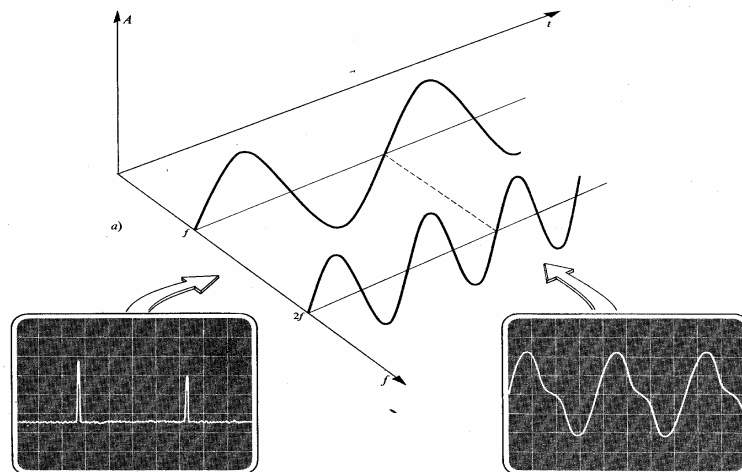
modo da formare un segnale unico risultante, determinato dalla somma istante per istante

dei due segnali di ampiezza A_1 e A_2 e frequenza l'uno il doppio dell'altro.

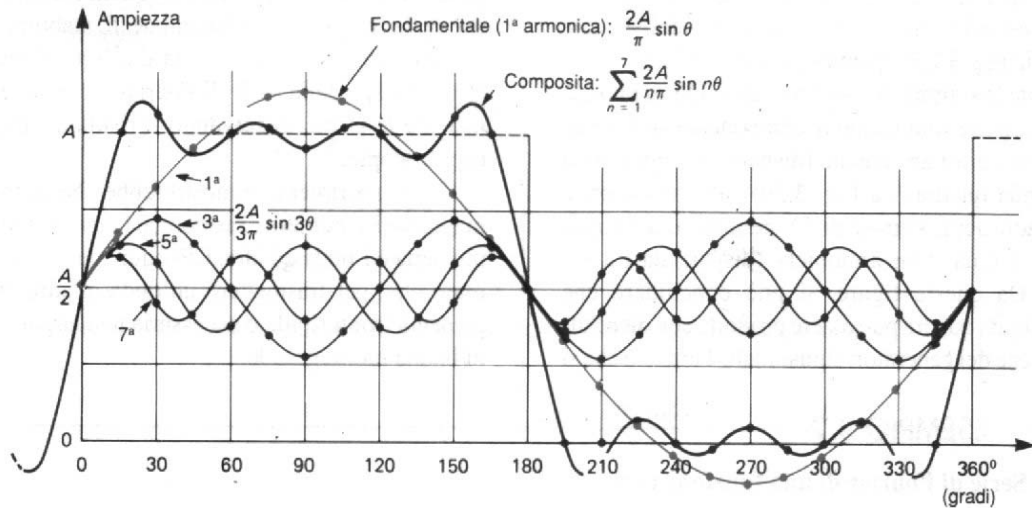


La somma dei due segnali ricompone, approssimativamente, il segnale non armonico.

L'approssimazione dipenderà in genere dal numero di armoniche considerate.



Per una onda quadra buone approssimazioni si ottengono considerando fino alla settima armonica, mentre per approssimazioni ottimali si devono valutare almeno undici armoniche.



Quindi, secondo il teorema di Fourier, una funzione periodica $y(t)$ è sviluppabile in una serie costituita da un termine costante A_0 e da una somma di infinite sinusoidi:

$$y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\omega_0 t)$$

le cui frequenze f_n sono multiple intere della frequenza f_0 della funzione data:

$$f_0 = \frac{1}{T} \quad f_n = n f_0$$

e di ampiezze A_n e B_n calcolabili secondo le formule:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt \quad A_n = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad B_n = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin(n\omega_0 t) dt$$



Le funzioni aperiodiche possono essere concepite come funzioni periodiche allorché il periodo tende a crescere fino all'infinito.

Allora la distanza fra due righe dello spettro a righe tende a zero e lo spettro diventa a bande continue.

La serie di Fourier si trasforma in un integrale che assume il nome di Trasformata di Fourier, che rappresenta la distribuzione continua delle frequenze presenti in un segnale aperiodico.

Quindi, se il segnale in esame non è periodico (e quindi si può assumere il suo periodo T come infinito) si può ricorrere all'integrale di Fourier che porta ad una funzione continua nel dominio della frequenza sia per quanto riguarda l'ampiezza sia per quanto riguarda la fase.

Questo accade perché le varie armoniche dello sviluppo in serie si avvicinano sempre più tra loro, fino al punto che le righe spettrali divengono indistinguibili.

1.5 Metodi di analisi in frequenza

I metodi per l'analisi in frequenza dei segnali possono essere a grandi linee classificati secondo due metodi fondamentali: analogici o digitali.

I metodi analogici più utilizzati sono: il metodo del “*filtro passabanda*”, il metodo del “*filtro con sweep in frequenza*” ed il metodo del “*filtro selettivo fisso e spostamento in frequenza del segnale da analizzare*” o detta anche “*a tecnica supereterodina*”



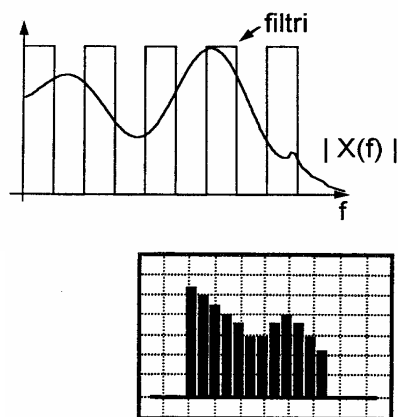
I metodi di tipo digitale si basano tutti sull'utilizzo di analizzatori che sfruttano l'algoritmo FFT.

1.5.1 Metodo del Filtro Passa Banda

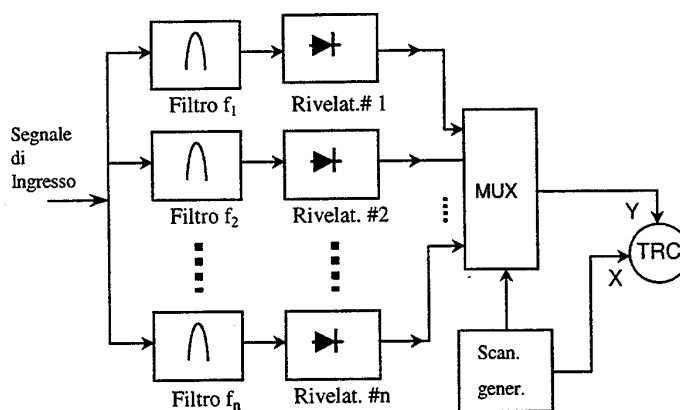
Questo metodo di analisi in frequenza è stato utilizzato per molti anni.

Rappresenta una tecnica di analisi molto facile da implementare, ma è incapace di fornire un'analisi ad elevata risoluzione ed inoltre è richiesto un filtro passa banda per ognuna delle frequenze che deve essere analizzata.

La soluzione per esaminare contemporaneamente le risposte a più frequenze prende il nome di *analizzatore di spettro real time*.



Rappresentazione dello spettro con analizzatore real-time



Schema di principio di un analizzatore *real-time*

Ogni filtro è centrato alla frequenza di interesse per recuperare il solo contenuto informativo nella singola banda desiderata.



Tuttavia, se il numero di componenti di interesse aumenta a dismisura (come nel caso di segnali transitori) non è opportuno ritenere di poter eseguire numerose operazioni di filtraggio in tempi diversi, per poi collezionare queste informazioni come unico risultato di misura; tale risultato potrebbe, infatti, essere uno specchio poco fedele del segnale in analisi

Sappiamo, infatti, che i segnali transitori, in quanto dotati di banda illimitata, sono caratterizzati da un numero teoricamente infinito di componenti spettrali.

Quindi solo nell’ipotesi, abbastanza verosimile, che queste componenti siano trascurabili da un certo valore di frequenza in poi, si può ritenere che lo spettro del segnale sia contenuto in un campo finito di frequenze.

Relativamente a questa soluzione, si osserva che i filtri passabanda lavorano in parallelo. La banda passante di ciascun filtro, ovvero la risoluzione in frequenza del filtro, è tale da evitare eventuali sovrapposizioni con le bande adiacenti.

A valle dei filtri sono presenti rilevatori che restituiscono un segnale continuo di valore pari al valore efficace del segnale al loro ingresso. In ingresso al multiplexer, quindi, vi saranno vari livelli di tensione, ciascuno dei quali rappresenta l’ampiezza dello spettro del segnale di ingresso in una ben precisa banda di frequenze. Il generatore di scansione stabilisce per ogni istante di tempo quale uscita dei rivelatori deve essere visualizzata.

Visualizzare lo spettro di un segnale significa operare su di un diagramma frequenze (asse orizzontale) - ampiezze (asse verticale). Operando una scansione orizzontale dello schermo



(come nel caso degli oscilloscopi) occorre, quindi, creare una corrispondenza tra tempo di scansione e campo di frequenze e, più specificatamente, tra istanti di tempo di scansione e valori di frequenze di analisi. Per l’analizzatore in questione, ciò si traduce nell’abilitare, tramite lo stesso generatore di scansione, l’uscita di ciascun rivelatore in istanti di tempo differenti; è possibile così creare una corrispondenza tra questi istanti e le frequenze centrali dei filtri il cui rivelatore è stato abilitato nel medesimo istante.

Questo strumento è particolarmente indicato per l’analisi dei segnali le cui caratteristiche spettrali evolvono nel tempo, in quanto, come già detto, consente il prelievo contemporaneo di tutte le informazioni dello spettro.

Tuttavia, la richiesta di una sempre maggiore risoluzione spinge verso l’utilizzo di un numero crescente di filtri, di qualità sempre superiore (banda stretta), con conseguente aggravio dei costi dell’analizzatore. Inoltre, i filtri peggiorano in risoluzione all’aumentare della frequenza, cosicché non è perseguibile la strategia di realizzare un analizzatore di spettro real time in un range di frequenze molto ampio, non solo per i costi ma anche per la qualità del risultato.

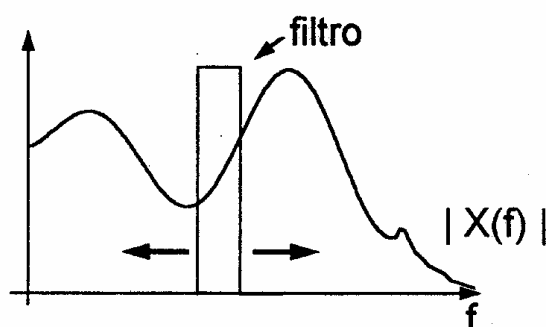
Ciò spiega il perché questa soluzione non è molto diffusa e le sue realizzazioni trovano giustificazione in applicazioni specifiche.

.



1.5.2 Metodo del Filtro con Sweep in Frequenza

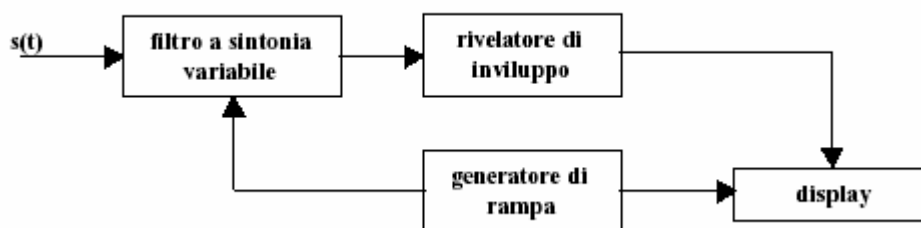
Per analizzare lo spettro di un segnale periodico una prima soluzione proposta è quella basata sul *filtro a sintonia variabile*.



La tecnica impiegata da questo metodo è quella di utilizzare un unico filtro in grado di poter variare le frequenze centrali del filtro passa banda stesso in modo tale da permettere un'analisi in intervallo di frequenze più esteso. Permette larghezze di banda più ristrette (alta risoluzione), ma richiede un tempo assai lungo per l'analisi.

Questo unico filtro esamina un'ampia gamma di frequenze e si avvale di un controllo in tensione, talvolta esterno allo strumento, per regolare la propria frequenza centrale.

Lo schema a blocchi di un tale analizzatore è mostrato in figura.





Essa mostra, tra l’altro, la presenza del blocco “rivelatore di inviluppo”, preposto al recupero dell’inviluppo del segnale in uscita al filtro.

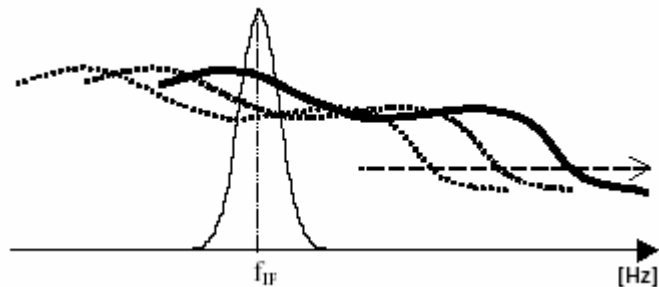
La rampa ottenuta dal generatore di scansione stabilisce il tempo di filtraggio, e regola il valore della frequenza che di volta in volta è analizzata. Nel tempo T , necessario per scandire tutto il display, viene analizzata una gamma di frequenze che vanno da $f_o \min$ a $f_o \max$, dove f_o è la frequenza a cui è centrato il filtro.

Le prestazioni di questo analizzatore sono fortemente limitate dall’impossibilità di mantenere costante la risoluzione del filtro sull’intero campo di frequenze di analisi. In particolare, maggiore è la frequenza centrale del filtro, meno spinta sarà la sua risoluzione.

1.5.3 Metodo del Filtro selettivo fisso e spostamento in frequenza del segnale da analizzare (analizzatore di spettro a supereterodina)

Per superare i limiti evidenziati dalle soluzioni precedenti, si ricorre alla tecnica di *supereterodina*.

Questa soluzione prevede un filtro passabanda a frequenza intermedia f_{IF} fissa, ed una modulazione del segnale da analizzare, in modo che il suo spettro si sposti lungo l’intero asse delle frequenze. In pratica, l’effetto della modulazione è di traslare ciascuna componente dello spettro alla frequenza f_{IF} , e ciò è ottenuto mediante un segnale modulante di tipo sinusoidale con frequenza variabile linearmente nel tempo.



Il campo di frequenze richieste all'oscillatore locale per la corretta modulazione è generalmente indicato con $f_o \min \div f_o \max$, dove:

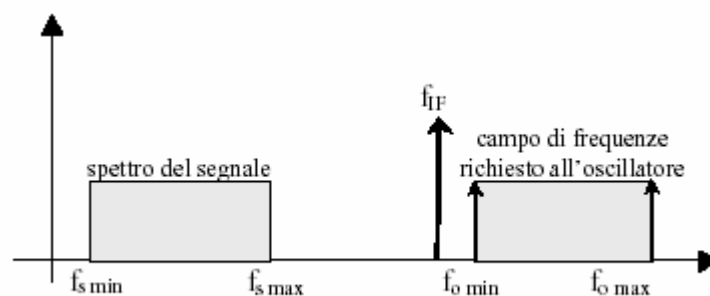
- $f_o \min$ è quel valore di frequenza che trasla a f_{IF} la componente a più bassa frequenza inferiore dello spettro del segnale d'interesse;
- $f_o \max$ è quel valore di frequenza che trasla a f_{IF} la componente a più alta frequenza superiore dello spettro del segnale d'interesse.

Analiticamente, detta f_s la frequenza della generica componente dello spettro del segnale, risulta:

$$f_s = f_o - f_{IF}$$

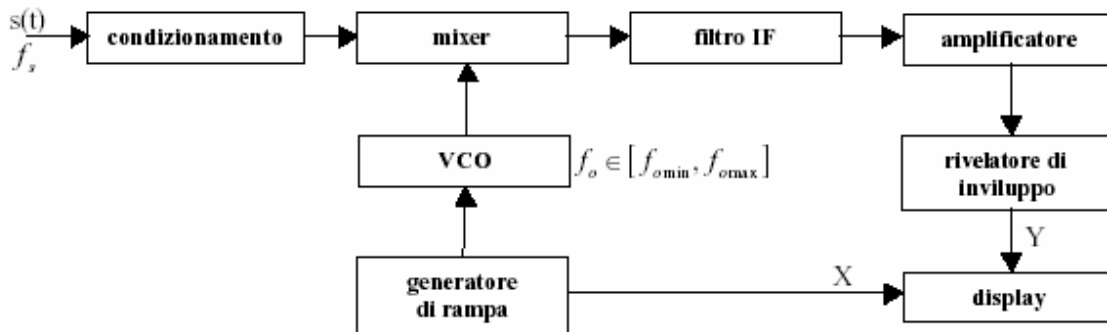
ed in particolare $f_s \min = f_o \min - f_{IF}$ e $f_s \max = f_o \max - f_{IF}$.

Graficamente la situazione è rappresentata in figura:





Lo schema a blocchi dell'analizzatore di spettro a supereterodina è riportato in figura:



Sia, per semplicità, $s(t) = SM\cos(2\pi f_s t)$ il segnale di ingresso da analizzare. In uscita al VCO è presente un segnale, $v(t) = VM\sin(2\pi f_o t)$, con frequenza f_o variabile linearmente nel tempo. I segnali $s(t)$ e $v(t)$ producono in uscita al mixer la somma di due segnali sinusoidali, rispettivamente di frequenza $f_o - f_s$ e $f_o + f_s$.

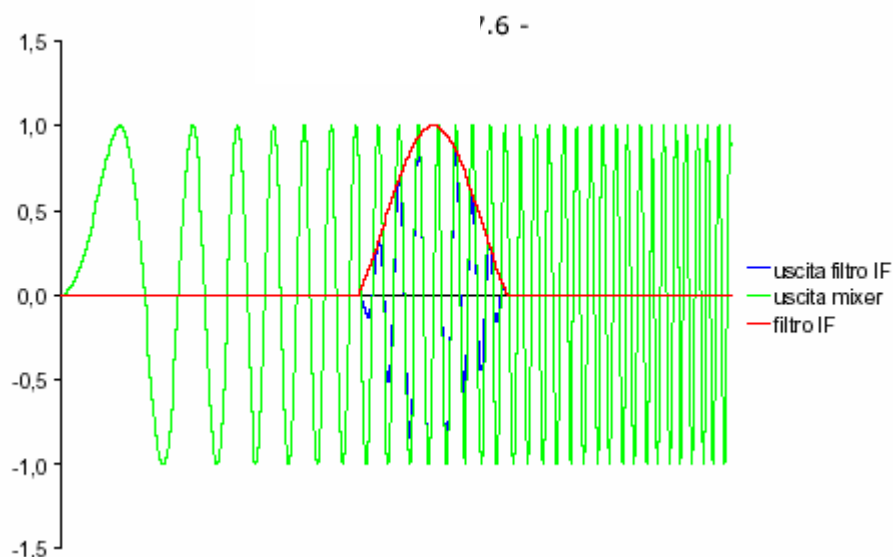
Per gli istanti di tempo t per cui risulta $f_o \pm f_s \neq f_{IF}$, non viene visualizzata alcuna traccia sul display. Viceversa, se per un certo istante t^* risulta $f_o \pm f_s = f_{IF}$, allora in corrispondenza di tale istante viene visualizzato il segnale in uscita al rivelatore di inviluppo.

Il funzionamento dell'analizzatore di spettro a supereterodina è, pertanto, il seguente: il generatore di rampa stabilisce la velocità con cui sono fornite dall'oscillatore locale le diverse frequenze f_o mediante le quali è modulato il segnale $s(t)$; quando la f_o è tale da soddisfare il legame tra la frequenza centrale f_{IF} del filtro ed il segnale $s(t)$, sullo schermo viene visualizzato un singolo tono.

Se il segnale di ingresso è dotato di uno spettro composito, la visualizzazione dei diversi toni avviene in corrispondenza di un insieme di f_o appartenenti a $[f_o \min, f_o \max]$.



La figura seguente descrive qualitativamente il funzionamento del circuito,



dove per semplicità, si è riportata solo una delle due componenti sinusoidali in uscita al mixer (in verde), ad esempio quella a frequenza $f_o + f_s$, che è inviata al filtro a frequenza intermedia (il modulo della risposta in frequenza del filtro IF è riportato in rosso), fornendo il segnale riportato in blu. Quest’ultimo, grazie al rilevatore di inviluppo, produce un segnale la cui forma d’onda è, a meno di un fattore di scala, la riproduzione del modulo della risposta in frequenza del filtro IF.

Il segnale di tensione grazie al quale il pennello elettronico spazzola da sinistra verso destra tutto lo schermo è fornita, anche in questa configurazione, dal generatore di rampa. Pur avvenendo tutto il processo di analisi nel dominio del tempo, l’asse delle ascisse risulta



comunque tarato in frequenza, in virtù del legame esistente tra il tempo e la frequenza in uscita al VCO. Tuttavia, essendo fissata la relazione $f_s = f_o - f_{IF}$, la lettura sull’asse è da intendersi come frequenza del segnale, e non come quella del VCO.

I vantaggi della soluzione a supereterodina sono:

1. L’uso del solo filtro a frequenza intermedia fissa consente di risolvere il problema della perdita di risoluzione alle alte frequenze; cambiando la sua banda è, inoltre, possibile ottenere diverse risoluzioni;
2. Gli amplificatori che lavorano in frequenza possono esibire elevate prestazioni;
3. E’ possibile scandire ampi campi di frequenze.

I principali parametri di un analizzatore di spettro a supereterodina sono:

1. Range di frequenza – intervallo di frequenze analizzabili dallo strumento; gli analizzatori di spettro consentono, mediante il comando span, di analizzare porzioni di intervalli e, mediante il comando center frequency, di centrare sullo schermo la frequenza desiderata; la loro combinazione permette di studiare il segnale nell’intervallo desiderato;
2. Risoluzione in frequenza – banda a $-3dB$ del filtro a frequenza intermedia; è la capacità di distinguere due toni della stessa ampiezza prossimi tra loro; sovente la risoluzione è regolabile, da un valore minimo ad uno massimo. È spesso indicata con RBW.
3. Selettività – capacità di distinguere componenti con diversa ampiezza a frequenze prossime tra loro;



essa si indica con:

$$S = \frac{B_{-60dB}}{B_{-3dB}}$$

in accordo con la convenzione di imputare alta selettività a bassi valori di S; il rapporto è il fattore di forma del filtro: indica quanto sono ripidi i suoi fronti per garantire la visualizzazione di un eventuale tono di ampiezza ridotta vicino a quello presente in f_{IF} ;

4. Range dinamico – massima differenza di ampiezza ammissibile tra due componenti affinché possano essere visualizzati distintamente;

5. Sensibilità – minima ampiezza che il segnale in ingresso deve avere per poter essere analizzato.

Spesso l'amplificatore a valle del filtro IF è di tipo logaritmico; ciò consente di aumentare il range di ampiezza visualizzabile. Non è consigliabile, tuttavia, utilizzare la scala in decibel per rappresentare le ampiezze, ma lo è per le potenze.

Detto A il rapporto di due potenze P1 e P2, il suo valore espresso in decibel è dato da:

$$A_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

Ipotizzando che le potenze siano dissipate dalle tensioni V_1 e V_2 sulla stessa resistenza R , si ha:

$$A_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{V_1^2 R}{R V_2^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{V_1}{V_2} \right)$$



Pertanto, esprimere un rapporto di tensioni in dB significa aver ipotizzato che le due tensioni dissipino la stessa potenza sulla medesima resistenza.

L'unità di misura più diffusa negli analizzatori di spettro è il dBm . Esso è definito come:

$$P_{dBm} = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1mW} \right)$$

e fornisce una informazione sulla potenza rispetto al riferimento di $1mW$.

Una diffusa unità di misura, che prescinde dalle potenze, è il dBV . Un valore ha un'ampiezza pari ad A volt è equivalente in dBV tramite la seguente relazione:

$$A_{dBV} = 20 \log_{10} \left(\frac{A}{1V} \right)$$

e fornisce il valore di tensione in dB , riferendo la tensione misurata ad $1V$.

È sempre possibile creare, quindi, una unità di comodo che sia riferita ad un'unità di riferimento. Ad esempio, è possibile definire un dBt (dB tesla) per una misura di campo elettromagnetico in riferimento ad $1T$, oppure un dBa (dB ampere) per una valutazione di intensità di corrente elettrica in riferimento a $1A$. Si deve solo prestare attenzione ad utilizzare un fattore moltiplicativo, associato al logaritmo, che è 10 per le misure di potenze e 20 negli altri casi.

Il principale vantaggio che si ottiene nel rappresentare una grandezza in decibel è la velocità dei processi computazionali: lavorare con i logaritmi consente di avvalersi di utili proprietà, quali quelle del prodotto e della differenza.



Si supponga, ad esempio, di voler conoscere il rapporto delle ampiezze di due componenti spettrali di un segnale, di cui una è la fondamentale. Questo rapporto prende il nome di livello armonico. La sua valutazione è immediata perché l'asse delle ordinate del display di un analizzatore di spettro può essere tarato in decibel; la differenza dei rispettivi valori fornisce, infatti, l'informazione cercata perché coincide, a meno di una divisione per un fattore noto (10 o 20) ed un antilogaritmo, con il rapporto desiderato.

1.6 Analizzatori di spettro analogici

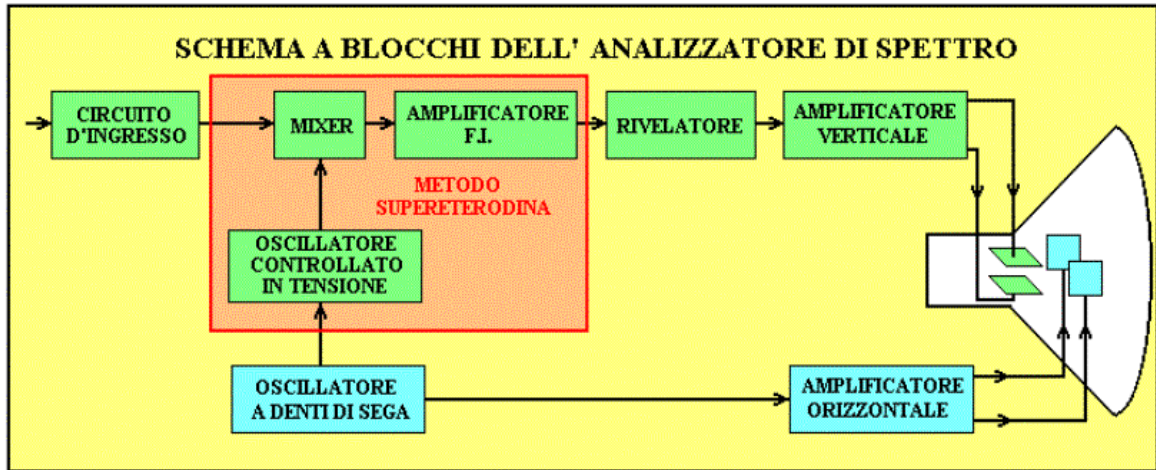
L'analizzatore di spettro è uno strumento elettronico in grado di rappresentare lo spettro di ampiezza di un segnale tempo variante.

Le applicazioni più importanti di questo strumento riguardano lo studio e l'analisi armonica dei segnali; l'impiego è dunque fondamentale nelle tecniche delle radiodiffusioni, nella trasmissione dati e nella telemetria. Ad esempio, lo strumento consente di verificare con grande precisione la larghezza di banda ed il livello del segnale emesso da una sorgente, analogica o numerica, permettendo dunque il progetto dei canali di trasmissione, la determinazione dell'influenza del rumore, ecc. ecc.

L'analizzatore di spettro è uno strumento che fornisce l'immagine, sullo schermo di un tubo catodico, dello spettro di ampiezza di un segnale elettrico.



Lo schema a blocchi semplificato dello strumento è rappresentato di seguito.



L'analizzatore di spettro è uno strumento che consente l'analisi di un generico segnale nel dominio della frequenza. Grandezze tipiche rilevabili sono ad esempio il valore efficace, la potenza, il periodo, la forma d'onda e soprattutto l'andamento dello spettro. Nel campo delle telecomunicazioni tale strumento consente di effettuare alcune importanti misure quali ad esempio quelle relative alla modulazione, alla distorsione, al rumore ed al rapporto segnale-rumore (SNR).

Così come un segnale elettrico lo si può visualizzare nel dominio del tempo con un oscilloscopio, analogamente con un analizzatore di spettro è possibile visualizzarlo nel dominio della frequenza, nel quale più facilmente è possibile effettuare ad esempio valutazioni sulla sua banda e sulla sua potenza. Ciò avviene secondo la nota teoria di Fourier, secondo la quale un qualsiasi segnale periodico è il risultato della sovrapposizione



di contributi sinusoidali che si differenziano tra di loro in ampiezza e/o fase. In tal senso quindi può essere utile conoscere il contenuto armonico di alcuni segnali su un certo intervallo di frequenze, oppure nell’ambito delle telecomunicazioni vedere se la portante di un segnale modulato interferisce con altri segnali e individuarne la banda occupata.

Esistono fondamentalmente due modi per fare misure nel dominio della frequenza e quindi, se si vuole, ci sono due diverse filosofie costruttive di un analizzatore: una si fonda sulla trasformata di Fourier mentre l’altra opera una scansione delle armoniche nella banda di interesse. Più dettagliatamente con la tecnica di Fourier si ha che il segnale viene campionato dopo di ciò i valori ottenuti sono opportunamente elaborati con algoritmi FFT (Fast Fourier Transform) e convertiti nel dominio della frequenza, quindi, infine, visualizzati sullo schermo dello strumento.

Tuttavia i più comuni analizzatori di spettro sono quelli “swept– tuned”. La tecnica in tal senso più usata è quella del ricevitore supereterodina. Il termine eterodina significa infatti traslazione in frequenza, ed in effetti l’analizzatore opera una scansione dell’intervallo di frequenze d’interesse mostrandone le componenti presenti in una banda traslata rispetto a quella d’ingresso.

Per meglio capire come funziona l’analizzatore che ci accingiamo ad esaminare si riporta uno schema semplificato degli elementi costitutivi la cui analisi ci consentirà di capire meglio il funzionamento dello strumento oltre alle sue caratteristiche salienti.



I componenti principali sono:

- un dispositivo attenuatore d'ingresso RF;
- un filtro LPF;
- un mixer;
- un blocco di guadagno IF;
- un filtro IF, un rivelatore;
- un filtro video;
- un oscillatore locale;
- un generatore di rampa;
- il video di un CRT (Catode Ray Tube) sul quale infine apparirà il segnale in esame.

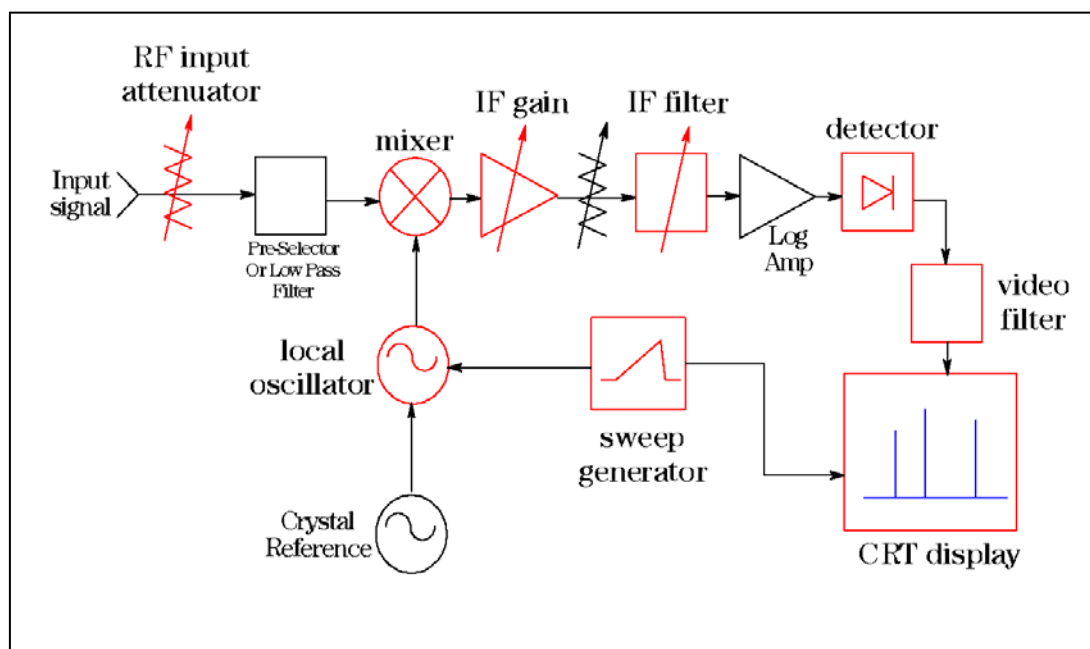


Figura 1 – Schema a blocchi di un analizzatore di spettro “swept tuned”



Dallo schema essenziale rappresentato in Figura 1 si osserva che il segnale in ingresso passa attraverso un filtro passa-basso (LPF) e quindi in un mixer che opera sull'ingresso con un segnale proveniente da un oscillatore locale. Il mixer è un dispositivo non lineare che come uscita restituisce, tra l'altro, i due segnali originari più la loro somma e la loro differenza. Tali segnali passano poi in un filtro a media frequenza (IF) dove sono opportunamente trattati, quindi un rivelatore d'involuppo a diodo ne valuta essenzialmente la potenza e trasmette tale informazione alle placche di deflessione verticali del tubo a raggi catodici (CRT). Un generatore di segnale a rampa, infine, controlla il raggio del tubo catodico spostandolo orizzontalmente sullo schermo da sinistra verso destra ed allo stesso tempo sincronizza l'uscita dell'oscillatore locale in modo che la sua frequenza d'uscita cambi proporzionalmente alla rampa.

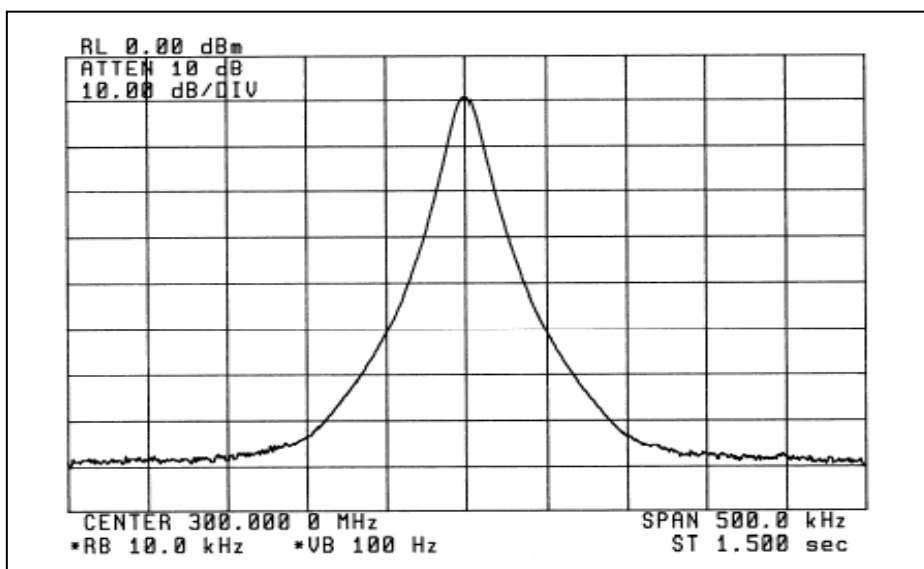


Figura 2 – Tipico display con impostazioni



La Figura 2 mostra il display di un tipico analizzatore di spettro controllato con microprocessore interno.

1.6.1 Descrizione e funzionamento

Descritto sommariamente l’andamento del segnale attraverso il dispositivo passiamo ad una analisi più approfondita dei singoli blocchi e di come operano affinché risulti anche più chiara la comprensione dell’analizzatore di spettro ed il suo modo di operare.

Il filtro LPF in ingresso serve per tagliare le componenti indesiderate in alta frequenza del segnale d’ingresso o come si dice abitualmente serve per la reiezione delle cosiddette frequenze immagini indesiderate del segnale a radiofrequenza (RF) d’ingresso.

1.6.2 Il mixer

Il mixer è un dispositivo che trasla un segnale da una frequenza ad un’altra. Come mostrato in Figura 3 esso é costituito da due porte d’ingresso: in una va il segnale d’ingresso vero e proprio f_{sig} da convertire alle frequenze intermedie (IF) e nell’altra quello proveniente dall’oscillatore locale, f_{LO} , interno allo strumento. L’uscita è costituita oltre che dai due segnali f_{sig} e f_{LO} , dalla loro somma $f_{sig} + f_{LO}$, dalla loro differenza $f_{sig} - f_{LO}$ ed in generale da tutte le combinazioni di $|n*f_{sig} \pm m*f_{LO}|$ con n ed m interi.

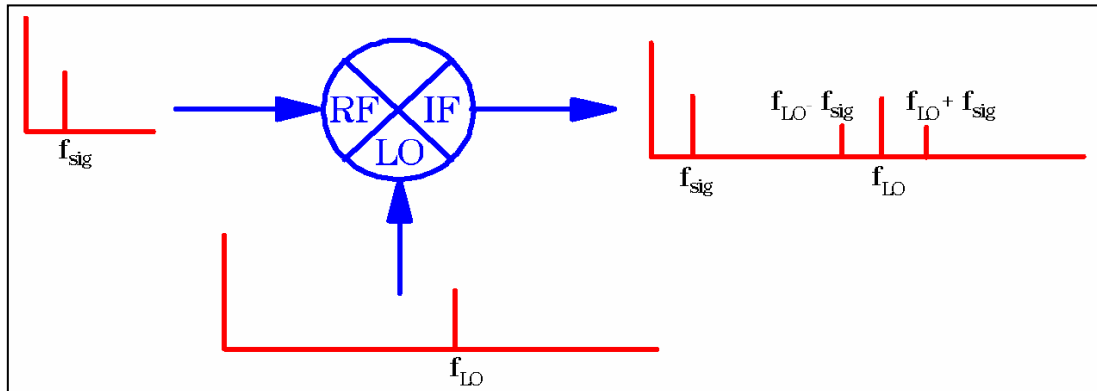


Figura 3 – Mixer con ingressi ed uscite

Tuttavia tra tutti questi segnali in uscita quelli con l’ampiezza maggiore sono, oltre a f_{sig} e f_{LO} , proprio quelli somma e differenza tra il segnale d’ingresso e quello interno dell’oscillatore locale. Tra questi ultimi due contributi in uscita quello che interessa ai fini dell’analisi è il segnale $f_{LO} - f_{sig}$, considerato ovviamente in valore positivo. In pratica ciò significa che si sposta il segnale d’ingresso a radiofrequenza (RF) ad una frequenza intermedia (IF) più opportuna, tipicamente 3.6 GHz (talvolta 3.9 GHz), ed a tale frequenza traslata l’ingresso sarà quindi filtrato, amplificato e trattato per essere infine visualizzato sullo schermo dell’analizzatore.

1.6.3 Il Filtro IF

Il filtro a frequenza intermedia rappresenta una parte fondamentale dell’analizzatore che ne determina in modo vincolante talune sue proprietà. E’ un filtro passabanda che va a “finestrare” il segnale in uscita dal mixer entro una certa banda. Tale banda è, entro certi

intervalli, regolabile dal pannello esterno dello strumento ed è definita come risoluzione della larghezza di banda (RBW). Esiste a tal proposito uno scambio tra la selettività in frequenza, che è praticamente la capacità del filtro di distinguere due armoniche contigue in frequenza e di ampiezza differente, il rapporto segnale-rumore e la velocità di misura dell'analizzatore stesso.

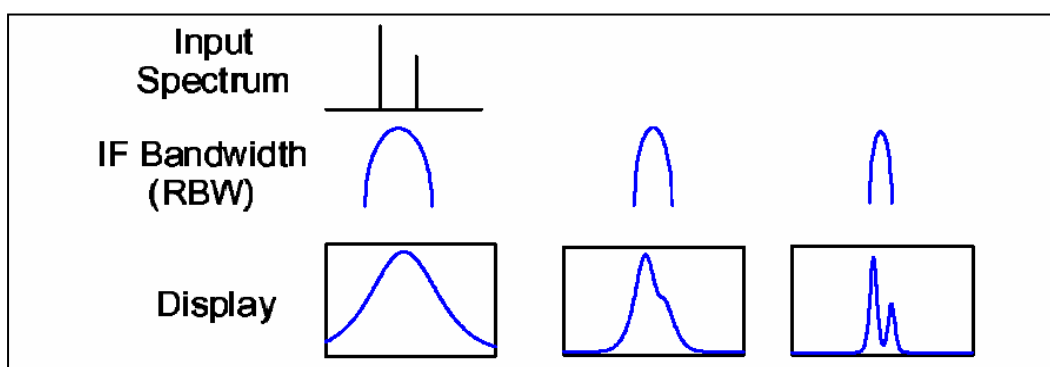


Figura 4 – Effetti della risoluzione su un ingresso costituito da due segnali di differente ampiezza

In altri termini più è stretta la banda del filtro a frequenza intermedia e migliore risulterà la selettività, così come rappresentato in Figura 4, ma aumentano proprio per questo motivo, ed anche sensibilmente, i tempi per la scansione dell'intervallo considerato.

Alcuni valori della larghezza di banda IF possono essere di qualche centinaio di Hz o per strumenti più raffinati una decina di Hz. In realtà quando si utilizzano filtri molto stretti diventa difficile riuscire a raggiungere una frequenza di 3.6 GHz. Tale difficoltà può essere risolta aggiungendo altri mixer, in numero variabile tra due e quattro, che consentono di



traslare il segnale alla frequenza intermedia in più passi così come ad esempio illustrato successivamente in Figura 5, dove viene riportata l’architettura di un analizzatore di spettro Agilent 71100 che realizza l’equazione:

$$f_{sig} = f_{LO1} - (f_{LO2} + f_{LO3} + f_{LO4} + f_{final IF})$$

nella quale la quantità tra parentesi vale:

$$f_{LO2} + f_{LO3} + f_{LO4} + f_{final IF} = 3.3 \text{ GHz} + 300 \text{ MHz} + 18.4 \text{ MHz} + 3 \text{ MHz} = 3.6214 \text{ GHz}$$

in pratica lo stesso risultato che si otterrebbe usando solo il primo filtro IF.

Si noti per la precisione che nello schema esemplificativo sono omessi i blocchi di amplificazione.

Diversi analizzatori a radiofrequenza ammettono una frequenza generata dall’oscillatore locale tanto bassa da risultare inferiore a quella del primo blocco IF. Poiché non c’è una condizione di isolamento infinita tra l’oscillatore e la le porte IF del mixer accade che il segnale LO è presente all’uscita del mixer.

Quando il segnale LO uguaglia quello IF allora viene trattato come segnale utile dal sistema e appare sul video. Questo fenomeno è denominato “feed through” ed in effetti può essere usato come un indicatore di zero Hz (0 Hz marker).

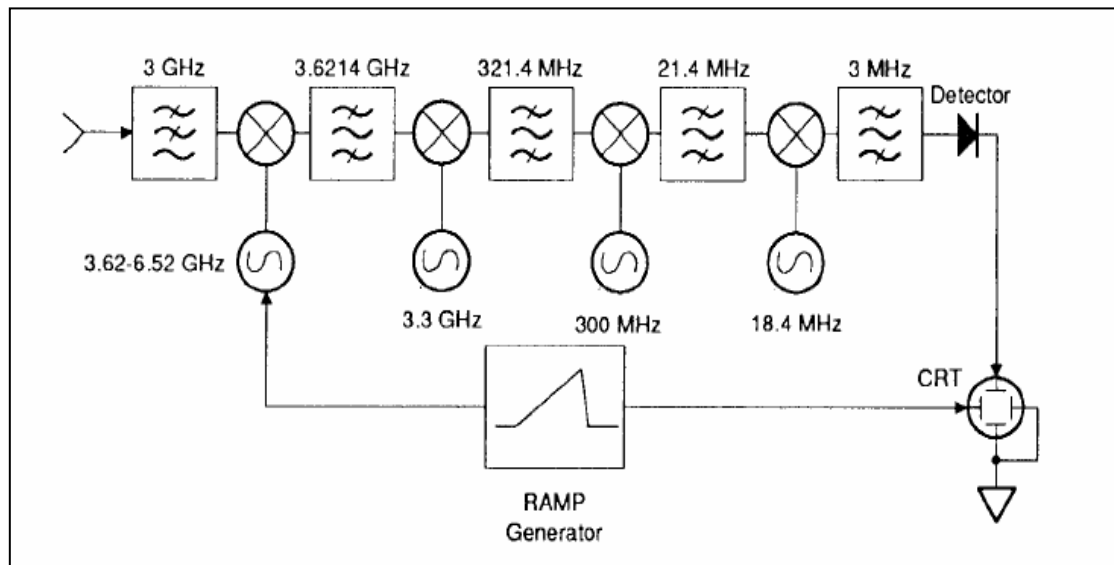


Figura 5 – Uso di più blocchi mixer (mixing steps) per raggiungere una frequenza intermedia IF

1.6.4 Rivelatore d'involuppo e filtro video

Si passa adesso all'analisi del blocco successivo della catena: il rivelatore d'involuppo a diodo. Talvolta è detto anche rivelatore di picco ed è un elemento circuitale che ha come uscita l'involuppo del segnale d'ingresso. Nel modello supereterodina il segnale in uscita dal blocco IF costituisce l'ingresso mentre l'uscita è il segnale video. Nella sua forma più semplice esso è costituito da un diodo seguito da un parallelo RC.

E' possibile osservare sotto come praticamente opera il blocco rivelatore su un segnale in uscita dal filtro a media frequenza:

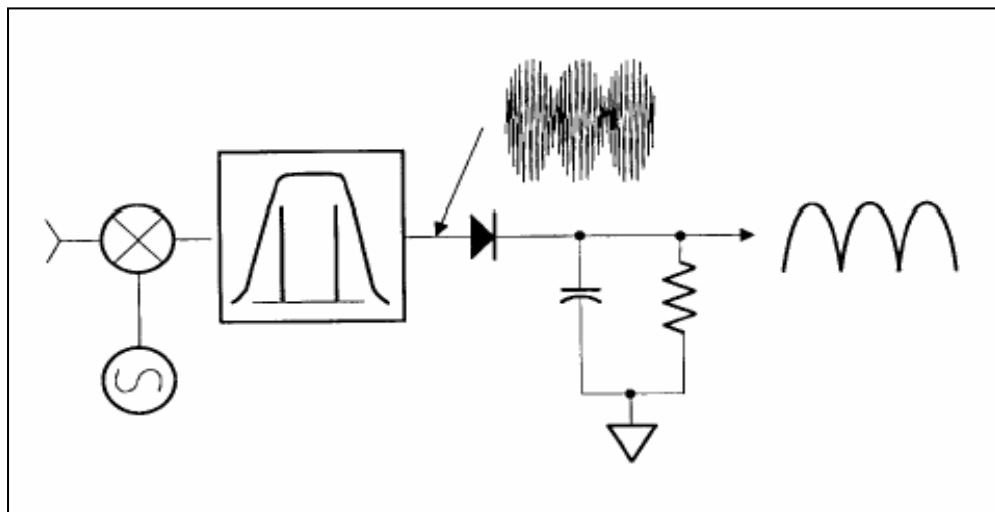


Figura 6 – L’uscita del rivelatore d’involuppo segue i picchi del segnale IF

Il rivelatore d’involuppo inoltre è un dispositivo che rende difatti l’analizzatore di spettro essenzialmente un voltmetro. La sua funzione è dunque quella di seguire le variazioni delle ampiezze dei picchi del segnale IF, non però nei suoi valori istantanei, tranne, come si vedrà poi, nel caso di modalità “zero span” dove esso diventa un demodulatore dell’ingresso visualizzandolo come segnale nel dominio del tempo.

Il blocco successivo che attraversa il segnale è il filtro video. E’ un filtro passabasso che determina la banda dell’amplificatore video e praticamente la sua funzione è quella di “levigare” la traccia visualizzata sullo schermo così come indicato nelle figure 7 ed 8:

L’analizzatore di spettro elabora sia il segnale utile che l’inevitabile rumore e quanto più il segnale è prossimo al livello del rumore tanto più è difficile poterlo individuare in modo nitido. Modificando però la banda del filtro video (VBW) e rendendola minore della RBW si riesce a diminuire l’escursione picco-picco del rumore e quindi a levigarlo con l’effetto



complessivo rappresentato sopra, rendendolo maggiormente distinguibile il segnale utile.

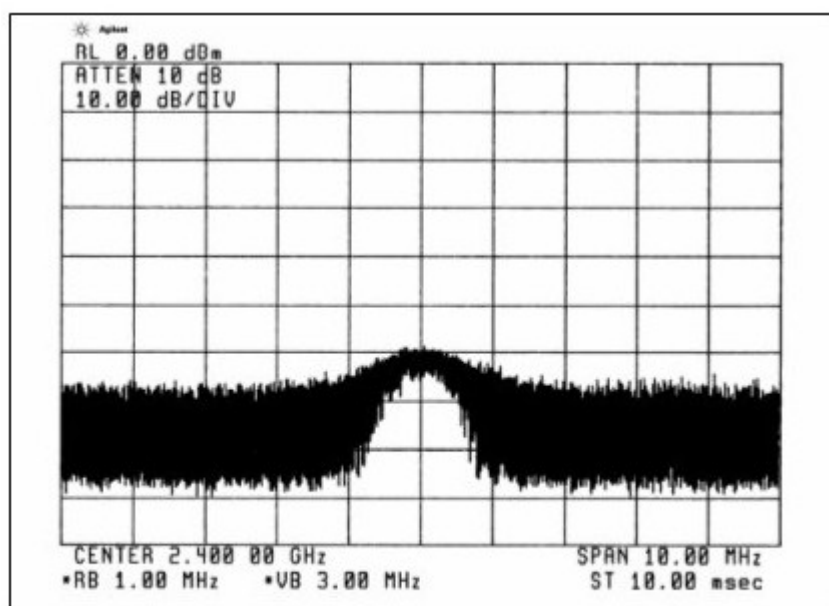


Figura 7 – Visualizzazione di un segnale con rumore

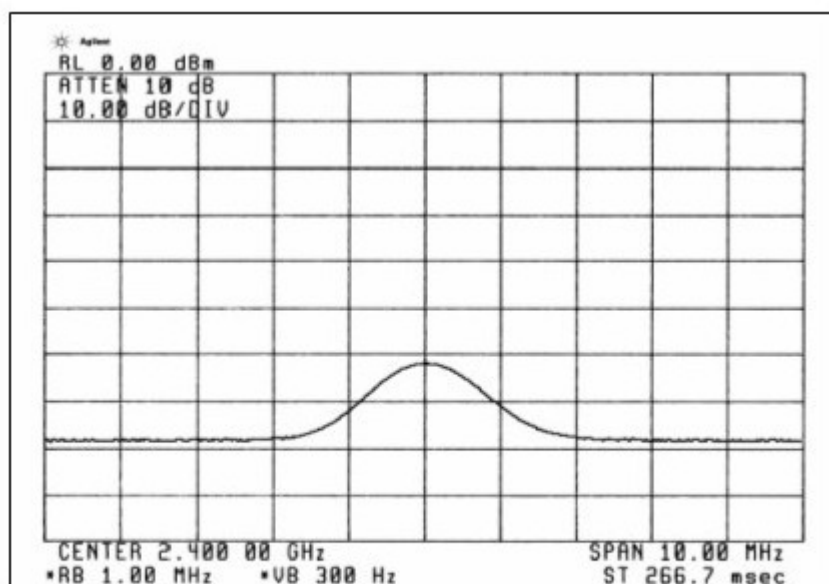


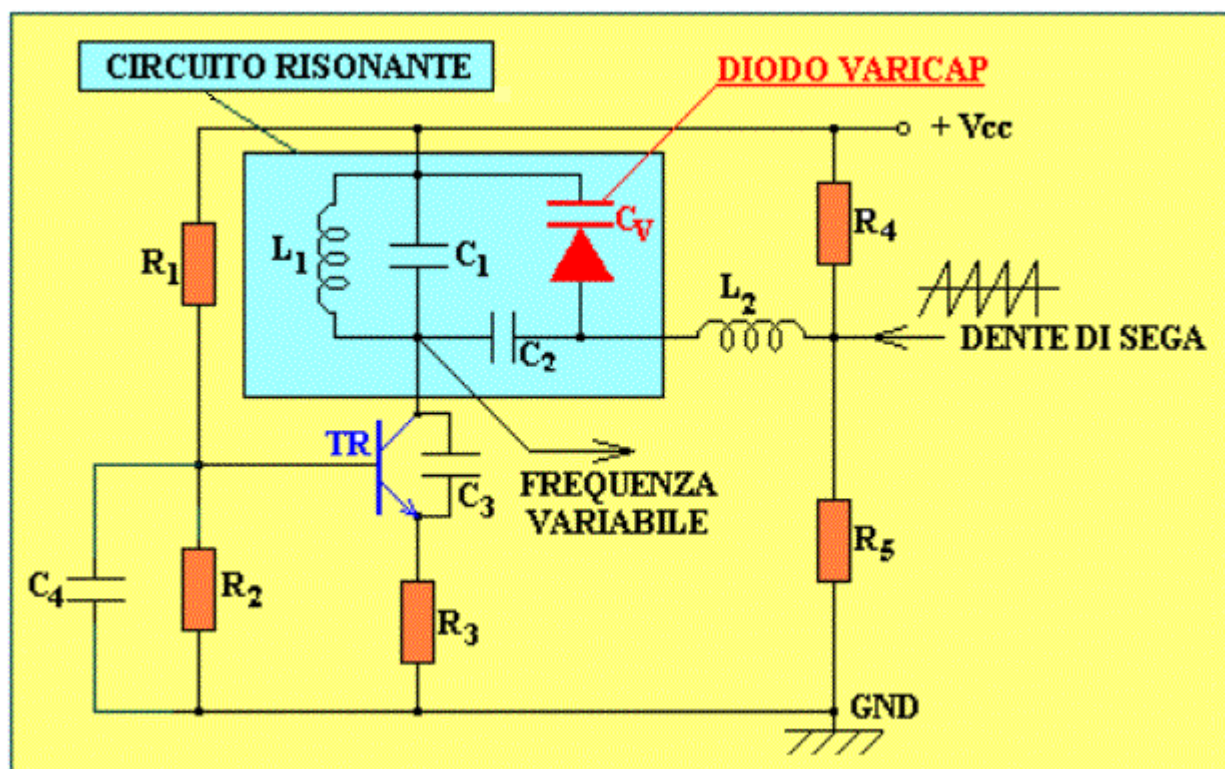
Figura 8 – Segnale dopo il "display"



Un ulteriore componente da considerare è l'oscillatore locale.

Esso è un oscillatore controllato in tensione (VCO) da un generatore di rampa (segnale a "dente di sega") che ne modifica la frequenza in modo proporzionale alla tensione di rampa.

Uno schema comunemente usato per realizzare l'oscillatore controllato in tensione **VCO** (Voltage Controlled Oscillator), ed anche in altri campi, ad esempio come modulatore di frequenza, o anche all'interno del PLL, è quello seguente:



Il transistor **TR** connesso a base comune, per mezzo della capacità C_4 , è fatto oscillare dalla



reazione positiva introdotta dal condensatore C_3 connesso tra emettitore e collettore.

Il circuito risonante costituito da L_1 e C_1 determina la sua frequenza di risonanza in assenza del diodo varicap C_V secondo la formula:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_1}}$$

La presenza del diodo polarizzato inversamente ne modifica la frequenza secondo la formula:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot (C_1 + C_V)}}$$

In quanto il condensatore C_1 si trova ad avere in parallelo, dinamicamente la capacità variabile C_V del diodo varicap.

Il partitore $R_4 - R_5$ serve a polarizzare opportunamente in modo inverso il varicap.

L’induttanza L_2 serve a separare la radiofrequenza dell’oscillatore e ad impedirle di immettersi nel circuito del generatore a dente di sega.

Tale generatore contemporaneamente muove il raggio del tubo catodico orizzontalmente da sinistra verso destra determinandone l’andamento in frequenza lungo l’asse delle



ascisse. In sostanza il generatore a dente di sega garantisce la sincronizzazione tra la scansione dell’asse orizzontale del video e la frequenza in uscita dall’oscillatore locale.

1.6.5 L’uscita video

L’uscita dell’analizzatore di spettro è una immagine su una griglia di assi X - Y presente sullo schermo del tubo a raggi catodici. Generalmente lo schermo è diviso in dieci intervalli orizzontali ed otto oppure dieci suddivisioni verticali. L’asse orizzontale è calibrato in frequenza che varia linearmente da sinistra verso destra. L’impostazione della frequenza dello strumento consiste di due passi: prima si fissa la frequenza centrale desiderata sulla griglia, poi si sceglie l’intervallo di frequenze (span) sulle dieci divisioni dell’asse orizzontale. E’ interessante osservare che scegliendo uno span pari a zero con un tempo di scansione (sweep time, ST) non nullo l’analizzatore di spettro visualizza l’andamento del segnale nel dominio del tempo, in pratica “diventa” un’ oscilloscopio.

L’asse verticale è calibrato in genere in ampiezza. Di solito un analizzatore consente la scelta di una scala lineare calibrata in volt oppure una scala logaritmica calibrata in dB ed altri anche una scala lineare in unità di potenza. La scala logaritmica è tuttavia la più utilizzata poiché permette di visualizzare un intervallo di grandezze maggiore rispetto a quella lineare. Le unità di misura standard sono in dBm (dB relativo ad 1 milliWatt), $dBmV$ o $dBuV$ (dB relativo al milliVolt o al microVolt rispettivamente). I moderni analizzatori sono solitamente dotati di opportuni microprocessori interni che consentono rapidamente il passaggio da una unità di misura all’altra.



1.6.6 Attenuatore RF e guadagno IF

Ritornando all'inizio dello schema vediamo cosa sono i blocchi tralasciati. L'attenuatore d'ingresso RF è posizionato tra il connettore che preleva il segnale esterno ed il mixer. La sua funzione è quella di regolare il livello del segnale incidente sul mixer per prevenire fenomeni indesiderati, come ad esempio la distorsione che potrebbe avvenire per ingressi troppo alti o a banda larga, e per regolare il range dinamico attraverso il controllo del grado di distorsione generata internamente.

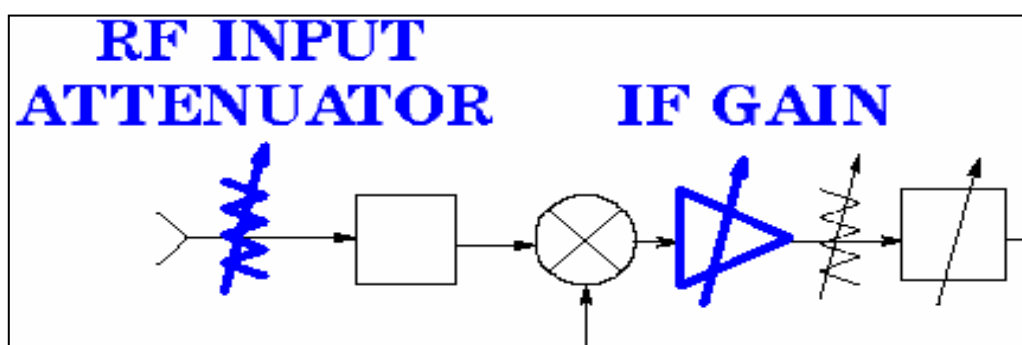


Figura 9 – Blocco attenuatore RF e guadagno IF ad azione congiunta

Il blocco IF ossia il guadagno a media frequenza, è posto prima del filtro IF. La sua funzione è quella di regolare la posizione verticale del segnale sullo schermo senza modificarne il suo livello così come è all'ingresso del mixer. In pratica si andrebbe a modificare il livello di riferimento. Dal momento che non vi vuole cambiare tale livello allora è implementato un legame funzionale tra l'attenuatore RF ed il guadagno IF: cioè il guadagno in modo automatico cambia e compensa l'eventuale attenuazione apportata



all'ingresso in modo che il segnale sul video resti inalterato ed allo stesso modo il livello di riferimento.

1.6.7 Visione dell'insieme di funzionamento

Una visione d'insieme di come i vari componenti interagiscono insieme in un analizzatore di spettro con relativi valori numerici è data dalla rappresentazione seguente (Figura 10) dove chiaramente si vede il percorso di un input, rappresentato da un segnale con frequenza compresa tra 1 GHz e 2 GHz, e di come esso viene visualizzato sul video dello strumento.

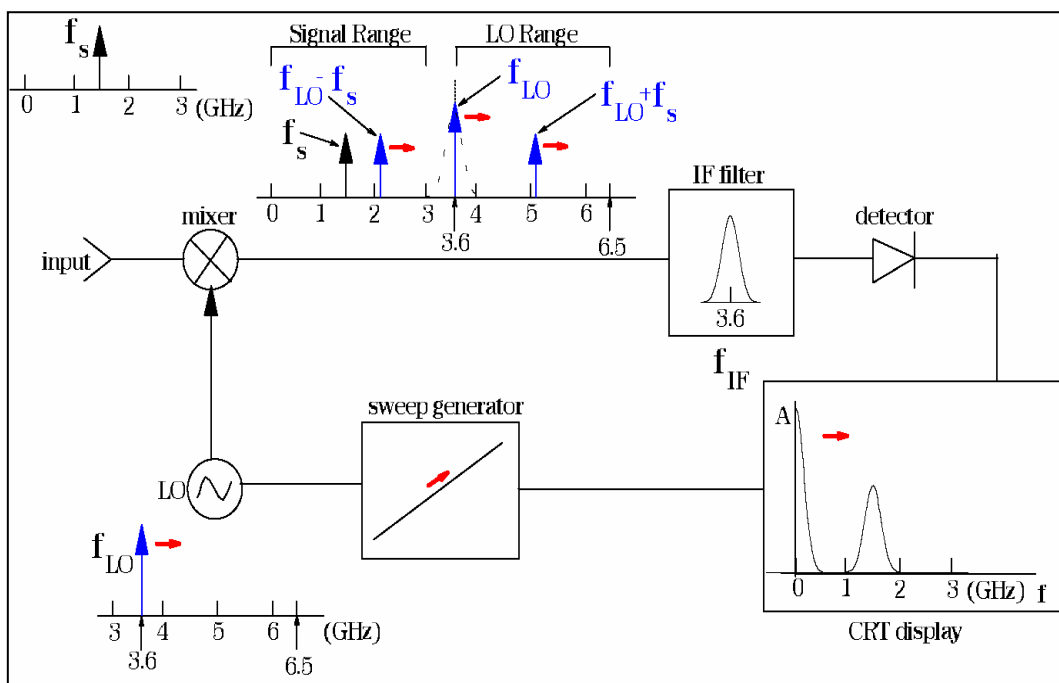


Figura 10 – Schema di funzionamento dell'analizzatore di spettro con un ingresso f_s



Con riferimento ai valori indicati si osserva la presenza di un segnale inaspettato a frequenza nulla che non esiste in ingresso! Come mai? Tale fenomeno è dovuto al fatto che il filtro IF preleva la frequenza dell'oscillatore locale a 3.6 GHz che entra esattamente nella sua banda come se in ingresso vi fosse un segnale a frequenza nulla. Tale contributo poi scompare e comincia ad entrarvi, aumentando f_{LO} , il contributo $f_{LO} - f_{sig}$.

1.6.8 Specifiche principali di un analizzatore

La conoscenza delle prestazioni di un qualsiasi strumento, e dunque anche di un analizzatore, passa attraverso la conoscenza delle sue caratteristiche date dai manuali e fogli tecnici (datasheet) o in altri termini la conoscenza delle capacità e/o dei limiti di uno strumento si evincono dalle sue specifiche. Per scegliere lo strumento adatto ad effettuare una generica misura occorre definire alcuni parametri fondamentali ovvero bisogna porsi alcune semplici domande essenziali quali:

1. quale è l'intervallo di frequenza a cui si vuole operare? ($\rightarrow$ range di frequenza);
2. quale è l'intervallo d'ampiezza consentito? ($\rightarrow$ ingresso massimo e sensibilità);
3. fino a che livello è possibile misurare la differenza tra due segnali riferendo ci sia all'ampiezza ($\rightarrow$ range dinamico) che alla frequenza? ($\rightarrow$ risoluzione);
4. quanto accurate sono le misure effettuate? ($\rightarrow$ accuratezza).

Partendo da tali quesiti focalizziamo l'attenzione sulle principali specifiche dell'analizzatore e su come esse intervengono nelle valutazioni delle caratteristiche del segnale da esaminare.



La scelta dell’intervallo di frequenza a cui si lavorerà è prioritaria poiché si vuole che l’analizzatore copra le frequenze fondamentali dell’applicazione che si sta studiando senza tralasciare contributi armonici rilevanti ai fini dell’analisi che si sta svolgendo ed allo stesso tempo escludendo le frequenze che non influenzano i fenomeni sotto osservazione.

1.6.9 Risoluzione

La risoluzione è una specifica che interviene quando si vogliono ad esempio misurare segnali contigui e si vuole distinguerli, o meglio rappresenta la capacità dello strumento di separare due segnali sinusoidali in due distinte risposte. Ciò è legato alla larghezza di banda ed alla forma del filtro IF ovvero alla risoluzione di banda (RBW). Il filtro IF dunque determina la capacità dell’analizzatore di distinguere o meno due segnali adiacenti in frequenza. Di solito la banda del filtro IF è specificata a 3 dB o anche talvolta a 6 dB. Quando si vogliono misurare due segnali di uguale ampiezza e contigui si seleziona opportunamente la RBW fino a che si riesce a visualizzarli separatamente. Per esempio se due segnali sono distanti in frequenza 10 kHz allora con una RBW di 10 kHz si riesce a separarli. In generale si può affermare che due segnali contigui in frequenza e di pari ampiezza possono essere distinti se la loro distanza in frequenza è maggiore o uguale alla larghezza di banda a 3 dB del filtro a media frequenza.



1.6.10 Selettività

La selettività è una proprietà che interviene nell'analisi di segnali di diversa ampiezza.

Essa è definita come il rapporto tra larghezza di banda a 60 dB e larghezza a 3 dB del filtro

IF così come illustrato nella figura 11 sottostante:

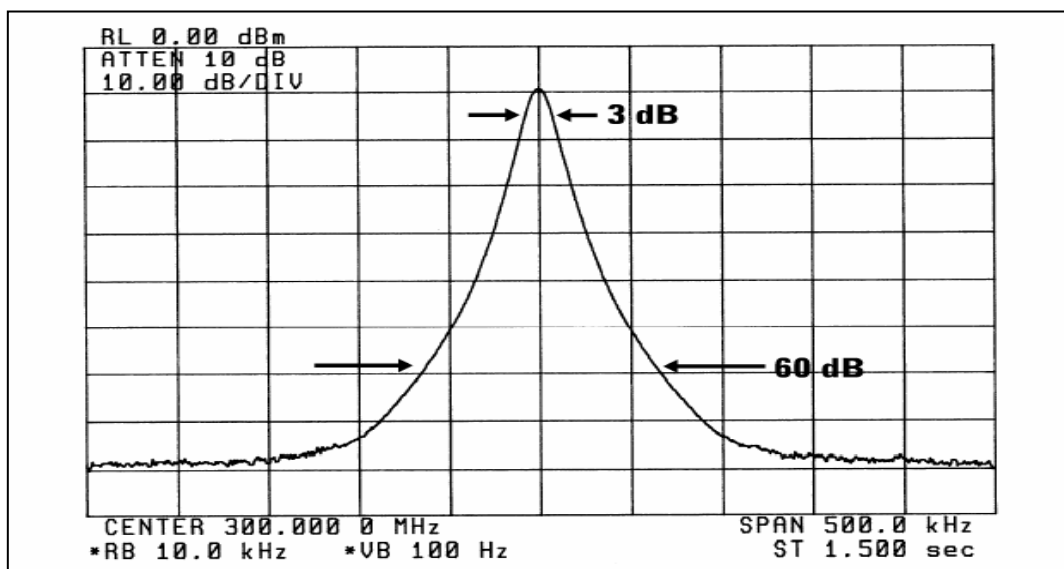


Figura 11 – Definizione di selettività: rapporto tra la larghezza di banda a 60 dB e a 3 dB

Valori tipici di selettività sono compresi nell'intervallo 11:1 → 15:1 per quanto riguarda i filtri analogici mentre vale circa 5:1 per i filtri digitali. Tale parametro è ovviamente una quantità sempre maggiore dell'unità e risulta tanto migliore quanto più è piccola in quanto questo fatto si traduce nell'avere una forma del filtro più stretta alla base.

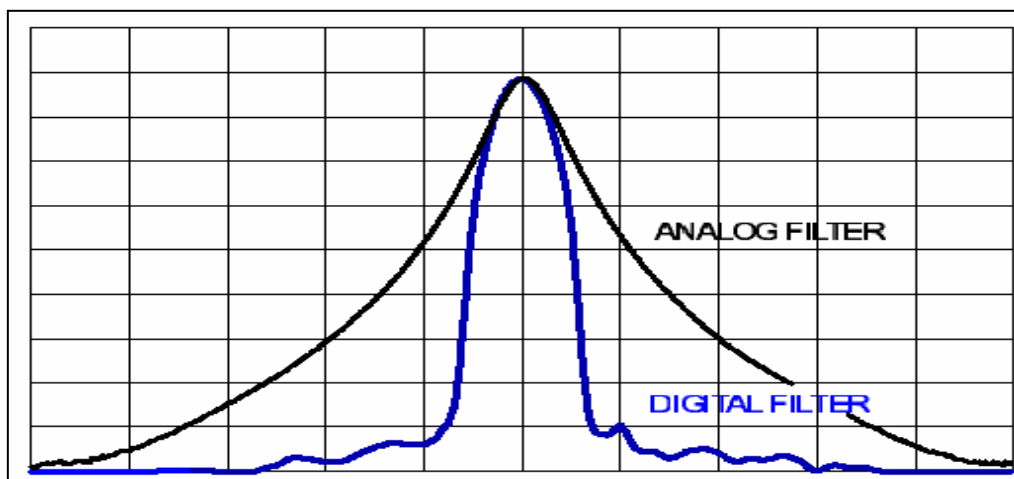


Figura 12 – La migliore selettività dei filtri digitali rispetto agli analogici

In altri termini operare con un filtro molto selettivo vuol dire avere maggiore capacità di poter individuare segnali vicini e con diversa ampiezza, cosa altrimenti non possibile se il filtro avesse una forma tale da allargarsi eccessivamente alla base coprendo eventualmente il segnale di ampiezza minore e difatti non rilevandolo. La forma e natura del filtro IF dunque determina la RBW.

1.6.11 Fattori che limitano la RBW

Un elemento importante che influenza il limite inferiore della RBW è la stabilità in frequenza dell'oscillatore locale interno all'analizzatore. Tutti gli oscillatori infatti in misura diversa sono modulati in frequenza o fase dal rumore aleatorio. Gli oscillatori utilizzati di solito in un analizzatore sono oscillatori YIG con un range tra 2 GHz e 7 GHz



e con una deriva che può avere l'entità di 1 kHz od anche più. Questo fenomeno di instabilità dell'oscillatore è anche conosciuto come FM residua. Se la RBW risulta inferiore alla distanza picco - picco di tale oscillazione allora succede che il segnale viene degradato e contributi che risultassero interni all'FM residua non potrebbero essere individuati. Questo dunque significa che l'FM residua dell'analizzatore determina la minima risoluzione di banda consentita, traducibile con la minima spaziatura in frequenza ottenibile per la separazione di due toni di uguale ampiezza. Gli effetti della FM residua non risultano molto visibili per una risoluzione piuttosto grande. Man mano però che si riduce la larghezza della banda del filtro IF allora tale disturbo diventa considerevolmente più evidente. Una ulteriore contributo di rumore riconducibile alla instabilità dell'oscillatore locale è costituito dal rumore delle bande laterali del segnale, noto anche come rumore di fase (*phase noise*).

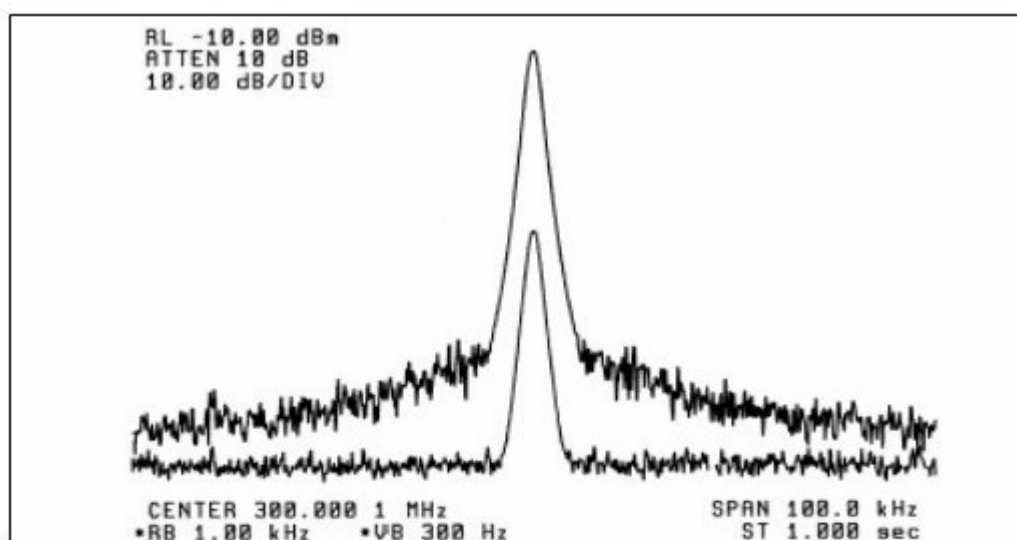


Figura 13 – L'effetto del "phase noise" è visibile quando il segnale è sufficientemente al di sopra del livello del rumore di base del sistema

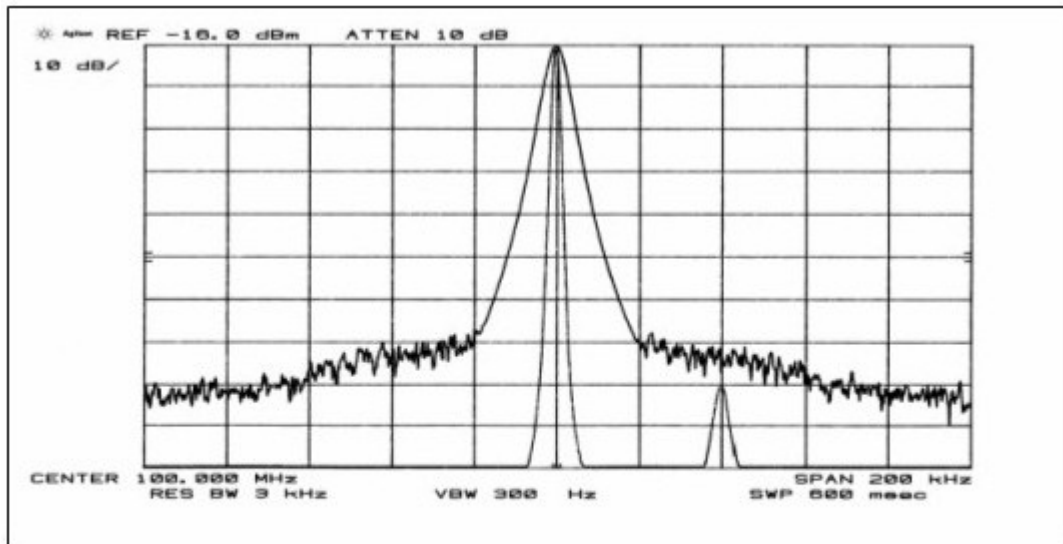


Figura 14 – Il rumore di fase può impedire la risoluzione di segnali di diversa ampiezza

La presenza di tale rumore ad esempio può mascherare un segnale prossimo alla portante o segnali di piccola ampiezza o comunque in generale può impedire la risoluzione di segnali di differente ampiezza anche se questi fossero comunque separabili con una opportuna RBW. In generale riducendo la RBW il livello del rumore di fase diminuisce.

1.6.12 “Trade-off” tra risoluzione e tempo di misura

Quando si riduce la RBW, come già detto, si migliora la risoluzione ma il prezzo da pagare in termini di prestazione è un aumento del tempo di scansione dell’asse delle frequenze. C’è uno scambio inverso: più si diminuisce la banda del filtro IF e più aumentano i tempi della misura.

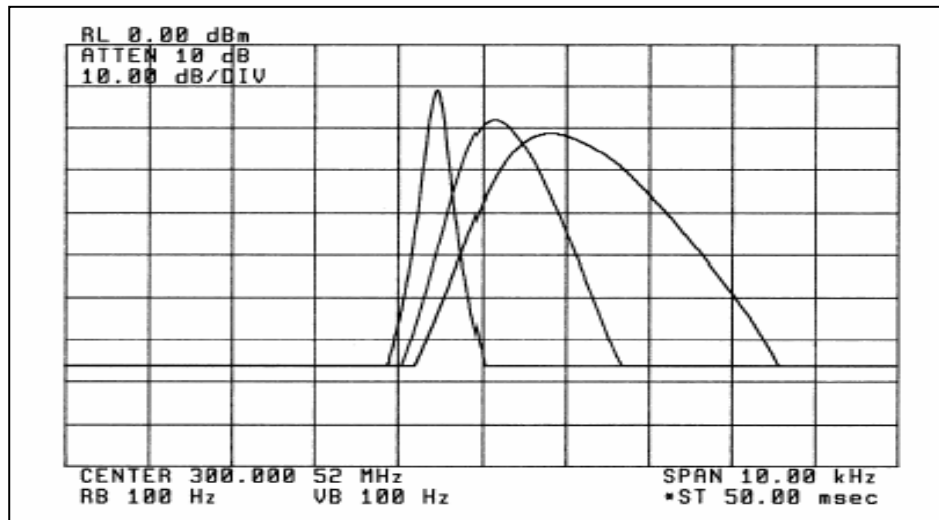


Figura 15 – Una scansione troppo veloce abbassa e trasla il segnale

Ciò perché il filtro è un circuito a banda limitata che richiede inevitabili tempi di carica e scarica.

In modo più preciso si può affermare che il tempo di salita del filtro è inversamente proporzionale alla sua larghezza di banda tramite una specifica costante k , cioè esiste la relazione seguente:

$$\text{Tempo di Salita} = k / (\text{RBW}).$$

D'altro canto se il tempo di scansione (sweep time, ST) fosse troppo piccolo il filtro non riuscirebbe a rispondere in tempo e ciò si manifesterebbe con una risposta sul video non calibrata sia per quanto concerne l'ampiezza, che risulterebbe inferiore e dunque abbassata, sia per quanto concerne la frequenza che apparirebbe traslata in avanti in frequenza così come si vede nella Figura 15. Anche questa grandezza è possibile relazionarla con la RBW



e lo SPAN attraverso una relazione di proporzionalità che ben evidenzia la “drammaticità” degli effetti sul tempo di misura alla riduzione della banda IF : $ST = k (SPAN) / (RBW)^2$!
In realtà molti analizzatori hanno un controllo su tale fenomeno scegliendo in modo automatico il più veloce tempo di scansione possibile una volta selezionati la RBW, lo SPAN e la VBW (poi vedremo successivamente cosa rappresentano queste ultime due specifiche) così come messaggi d’avviso appaiono quando ad esempio si vuole impostare un tempo di misura inferiore al minimo consentito.

1.6.13 Sensibilità

Uno dei possibili usi di un analizzatore di spettro è la ricerca e misura di piccoli segnali. Così come per un qualsiasi altro strumento anche qui la sensibilità rappresenta la capacità dello strumento di misurare segnali piccoli. Più esattamente in un analizzatore di spettro essa rappresenta il livello della più piccola sinusoide che può essere osservata sotto le migliori condizioni di minima risoluzione, cioè 0 dB d’attenuazione sull’ingresso e con minima banda video. La sensibilità è limitata dalla presenza del rumore termico, presente in ogni dispositivo elettronico, e dovuto essenzialmente al moto di agitazione termica degli elettroni e rappresentato dalla quantità kTB , dove k è la costante di Boltzman, T è la temperatura assoluta e B è la larghezza di banda. L’analizzatore di spettro caratterizza tale rumore con una opportuna grandezza rappresentante il livello di rumore medio visualizzato (DANL) ed espresso in dBm riferito alla più piccola RBW possibile. Tale parametro è indicativo della migliore sensibilità possibile di un analizzatore, infatti un segnale



d’ingresso che fosse al di sotto del livello di rumore non sarebbe individuabile. Generalmente la sensibilità di un analizzatore di spettro è compresa in un intervallo che varia all’incirca da -90 dBm a -145 dBm .

Un aspetto ulteriore che interviene sulla qualità del segnale sotto test interessa ancora l’attenuatore a radiofrequenze posto all’inizio della catena d’ingresso. La sua funzione è quella in pratica di regolare il livello del segnale in ingresso e non ha effetto sul livello di rumore interno poiché quest’ultimo è generato dopo il mixer. Tuttavia l’attenuatore RF regola il livello del segnale in ingresso quindi influisce complessivamente il rapporto segnale – rumore SNR. Dunque si può in tal senso affermare che il migliore SNR ottenibile a parità di ogni altra condizione è quello relativo alla minore attenuazione RF possibile. Ritorna ancora il solito discorso di trade-off: se aumenta l’attenuazione RF diminuisce la SNR. Ricordiamo infine che, tenendo presente lo schema iniziale, l’attenuatore RF ed il blocco di guadagno IF posizionato a valle del filtro sono legati tra loro. Per quanto detto finora vuol dire che se ad esempio si dà una attenuazione d’ingresso di 10 dB e contemporaneamente aumento il guadagno IF di 10 dB per compensare la precedente attenuazione si ottiene sullo schermo un livello del segnale utile invariato ma un aumento del livello del rumore di 10 dB! E’ quest’ultima quindi una operazione che richiede un’opportuna cautela.

Il rumore termico generato all’interno dell’analizzatore di spettro presenta una densità spettrale di potenza praticamente costante su tutte le frequenze. In altri termini ciò vuol dire che il rumore non si “addensa” su intervalli di frequenza preferenziali ma resta sempre



lo stesso. Questo fatto comporta che il rumore complessivo che raggiunge il rivelatore a diodo dipende solo dalla larghezza di banda del filtro IF ovvero dalla RBW. Se si aumenta la RBW allora aumenta anche il livello di rumore DANL poiché ne passa di più attraverso una banda più larga.

1.6.14 Filtro video

Accenniamo ora alla larghezza della banda video (VBW). Il filtro video può essere adoperato per appiattire il rumore visualizzato per una più facile identificazione di segnali piccoli.

E’ in sostanza un filtro passabasso che segue il rivelatore e guida l’andamento del segnale sul video. Riducendo la frequenza di taglio del filtro video fino a che diventi minore o uguale di quella del filtro IF si ha che il sistema video non riesce più a seguire le rapide variazioni del segnale che passa attraverso i blocchi IF col risultato che si ottiene un effetto finale di media e di omogeneizzazione. Anche il filtro video ha un proprio tempo di risposta la cui equazione vale $ST = k (\text{Span}) / [(RBW)(VBW)]$ quando la banda video è minore o uguale alla risoluzione. Tale proprietà tuttavia non modifica la risoluzione dell’analizzatore, cioè cambiando la VBW non si migliora la sensibilità che resta invariata. Quello che si va a modificare è in effetti per così dire il grado di “discernibilità” del segnale utile rispetto ai vari contributi di rumore presente sullo schermo.



1.6.15 “Video Average”

Gli analizzatori con display digitali sono spesso dotati anche di una ulteriore opzione, ossia la possibilità di mediare il segnale video (video averaging). Un display è digitale se, sostanzialmente, opera tramite una modalità di rappresentazione del segnale che utilizza un numero finito di suoi punti memorizzati in apposite memorie precedentemente alla visualizzazione stessa. Il video averaging è compiuto su punti campionati dal segnale in due o più passi secondo l’algoritmo seguente:

$$A_{avg} = [(n-1)/n] * A_{prior\ avg} + (1/n) * A_n$$

dove A_{avg} è il nuovo valore medio desiderato, $A_{prior\ avg}$ è il valore precedentemente mediato, A_n è il valore calcolato corrente ed n rappresenta il numero dalla scansione corrente. La n è scelta dall’utente con un comando sullo strumento. Con questa procedura e per passi successivi si converge ad un valore mediato così come indicato nell’illustrazione 16 seguente che mostra tale effetto con 1, 5, 20 e 100 “spazzolate” successive sul segnale originario. La differenza tra il video filtering ed il video averaging è che il primo è una operazione in tempo reale, cioè è effettuata al procedere della traccia video, mentre la seconda richiede più scansioni successive della stessa traccia.

Tale differenza risulta importante nel caso in cui il segnale da studiare ad esempio dovesse cambiare nel tempo.

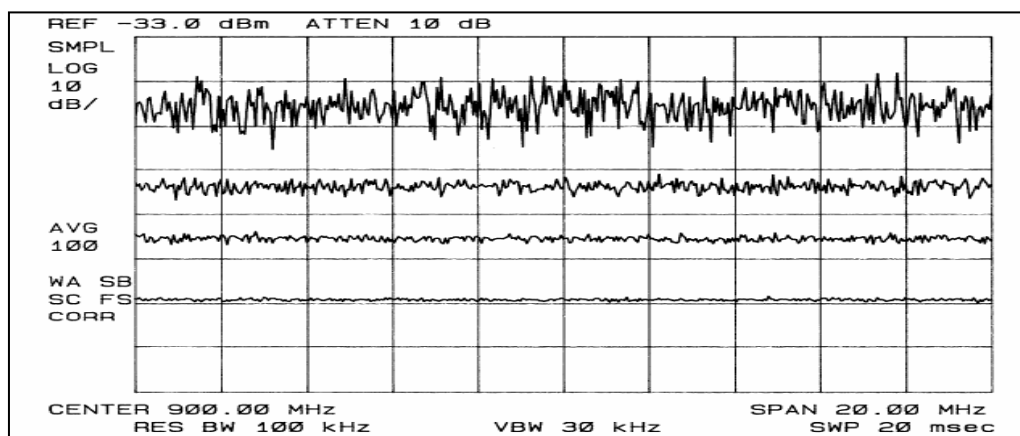


Figura 16 – Effetto del video averaging per 1,5,20 e 100 “spazzolate”

Concludendo il discorso fatto finora si può affermare che per ottenere la maggiore sensibilità possibile occorre che:

1. la RBW sia la minore possibile;
2. l'attenuazione RF d'ingresso sia la minore possibile;
3. ci sia un uso opportuno della banda del filtro video VBW

(tipicamente $VBW < 0.01 RBW$).

Notiamo ancora che le condizioni qui sopra consigliate determinano anche qualche effetto indesiderato. Ad esempio, come già visto, si ha un considerevole aumento dei tempi di misura per una RBW molto piccola così come una attenuazione d'ingresso troppo bassa porta ad una diminuzione dell'accuratezza della misura.