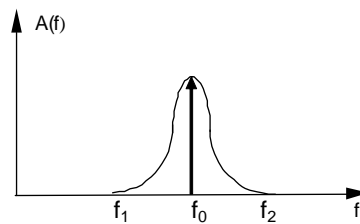
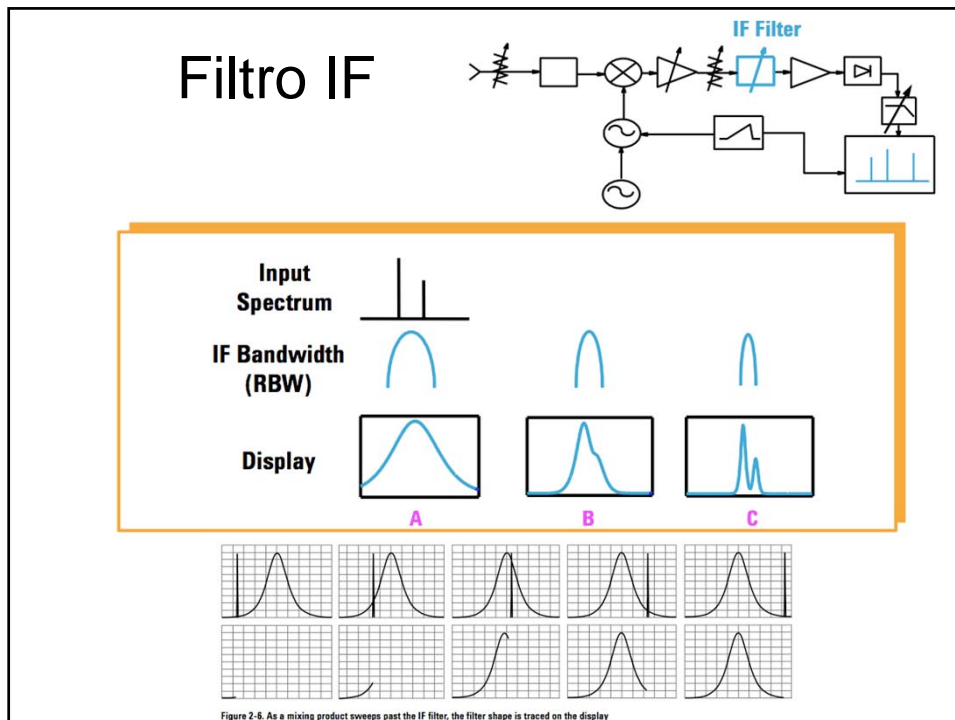


Parametri Analizzatori di Spettro

Risoluzione

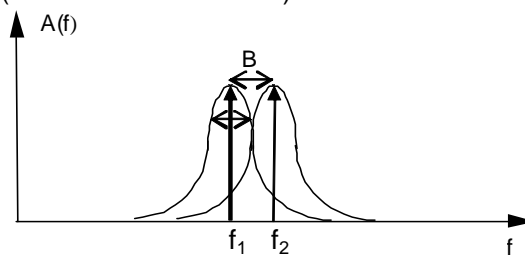
- **La risoluzione in frequenza rappresenta la capacità dell'analizzatore di spettro di presentare distinte sullo schermo due sinusoidi vicine in frequenza ed uguali in ampiezza.**
- Si noti che se si avesse in ingresso una sinusoide pura a frequenza f_0 l'analizzatore di spettro presenterebbe in uscita non una riga ma la curva di risposta dell'ultimo amplificatore. Infatti, se il segnale a frequenza f_0 viene traslato al centro del filtro IF per un certo valore f_{LO} dell'oscillatore locale, una frazione di questo segnale arriva sul rivelatore anche quando l'oscillatore locale genera un segnale compreso tra $f_{LO}-(f_0-f_1)$ e $f_{LO}+(f_2-f_0)$.



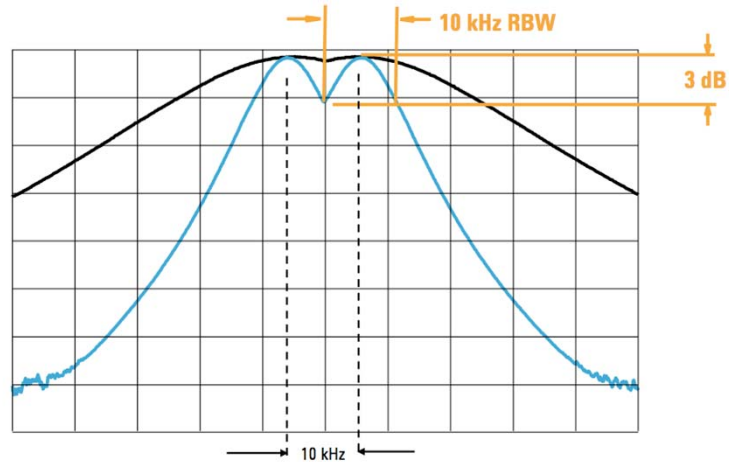


Risoluzione

- Affinché due segnali sinusoidali di uguale ampiezza risultino distinti devono essere distanziati in frequenza almeno della larghezza di banda B (a 3 dB) dell'ultimo amplificatore.
- Per questo motivo, la risoluzione dipende dalla larghezza di banda B dell'amplificatore IF e, nel caso di conversioni multiple, dalla larghezza di banda B dell'ultimo stadio.
- Gli analizzatori di spettro hanno la possibilità di variare da pannello la larghezza di banda del filtro posto prima del rivelatore e quindi la risoluzione con un comando hardware o software usualmente indicato come **RBW** (Resolution Band-Width)



Resolution bandwidth



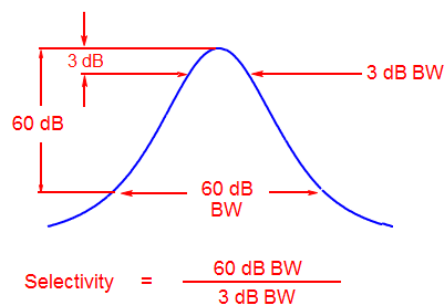
Determines resolvability of **equal** amplitude signals

Two equal-amplitude signals can be resolved if their separation is greater than or equal to the 3 dB bandwidth of the selected resolution bandwidth filter.

Selettività

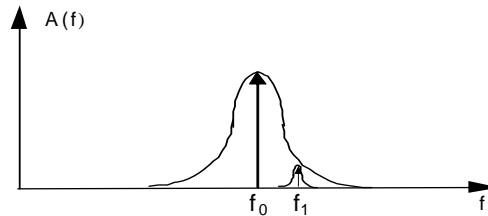
Un altro parametro che influenza la risoluzione in frequenza dell'analizzatore di spettro è la selettività del filtro IF.

La **selettività (Q)** di un filtro è definita come il rapporto tra la banda B_{60dB} del filtro ad una attenuazione di 60 dB e la banda B_{3dB} del filtro a 3 dB.



$$\text{Selectivity} = \frac{60 \text{ dB BW}}{3 \text{ dB BW}}$$

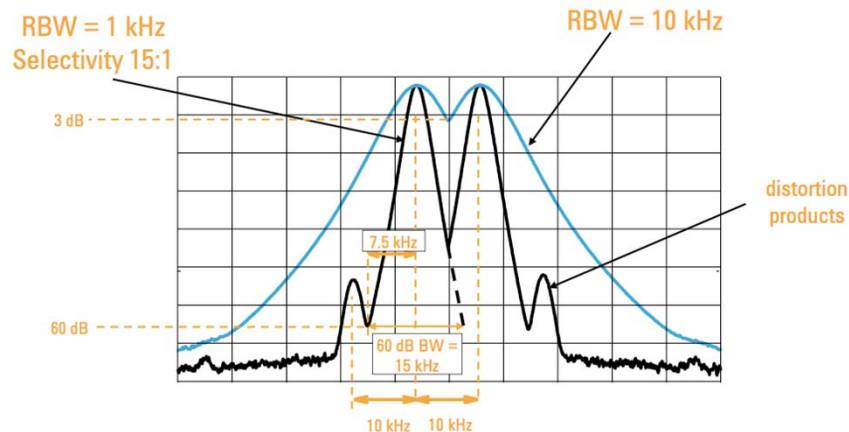
Selettività



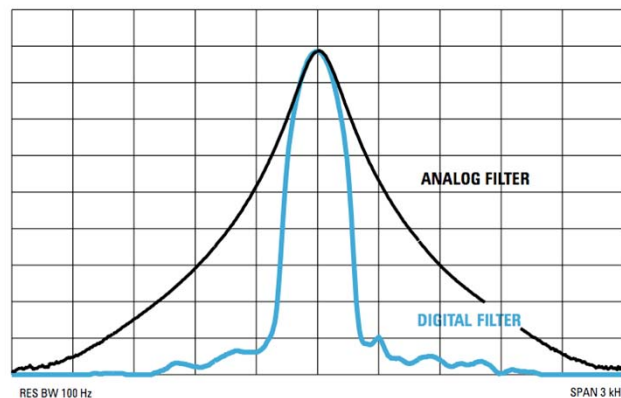
- Come si vede dalla figura, un segnale a frequenza f_1 ad una distanza da f_0 maggiore della banda a 3dB del filtro, non viene visualizzato a causa della selettività non infinita del filtro stesso.
- I valori di selettività dei filtri analogici variano tra 11 e 15, mentre con quelli digitali si può arrivare anche a 5. Questo è uno dei motivi che spinge verso l'uso di convertitori digitali subito dopo il mixer.
- Si noti che la risoluzione dell'analizzatore dipende anche dalla stabilità in frequenza degli oscillatori locali utilizzati. Come si è detto in precedenza il rumore di fase determina un allargamento della riga dell'oscillatore [valutabile con il parametro SSCR].

Selettività

Two-tone test where the signals are separated by 10 kHz. With a 10 kHz RBW, resolution of the equal amplitude tones is not a problem. But the distortion products, which can be 50 dB down and 10 kHz away, could be buried. Two signals unequal in amplitude by 60 dB must be separated by at least one half the 60 dB bandwidth to resolve the smaller signal.



Filtri analogici e digitali

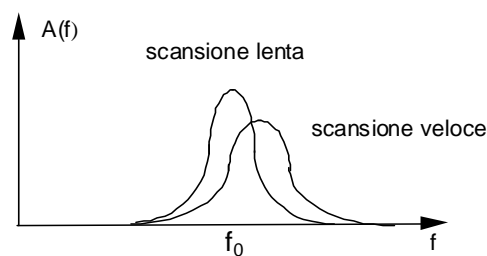


Typical Selectivity

Analog 15:1

Digital $\leq 5:1$

Tempo di spazzolamento (sweep time)



In un analizzatore di spettro è anche possibile settare il tempo di scansione (sweep time). Se la scansione è troppo veloce l'uscita del filtro rischia di non andare a regime provocando una distorsione nel segnale di uscita. Questo comportamento è mostrato in figura per una sinusoide.

Tempo di spazzolamento

Il tempo di risposta del filtro è dato da:

$$t_s = k/RBW$$

mentre il tempo di permanenza della riga spettrale entro RBW è dato da:

$$df/dt = RBW / t_{PERM} = \Delta f / t_{SWEEP}$$

$$t_{PERM} = RBW * t_{SWEEP} / \Delta f$$

dove df/dt è la velocità di scansione in frequenza,
 Δf è l'intervallo di frequenze visualizzato e
 t_{SWEEP} il tempo di scansione dell'intervallo.

Tempo di spazzolamento

Ovviamente dovrà essere:

$$t_{PERM} > t_s$$

$$RBW * t_{SWEEP} / \Delta f > k / RBW$$

Da cui risulta:

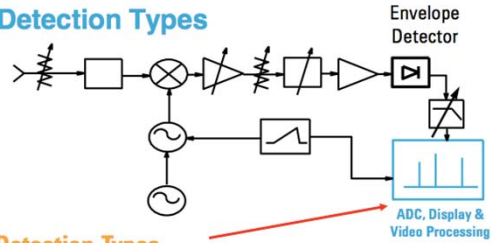
$$t_{SWEEP} \geq \frac{K \Delta f}{RBW^2}$$

Questo tempo è scelto automaticamente dall'analizzatore di spettro ma può anche essere variato dall'operatore (tempo grande = spazzolata lenta)

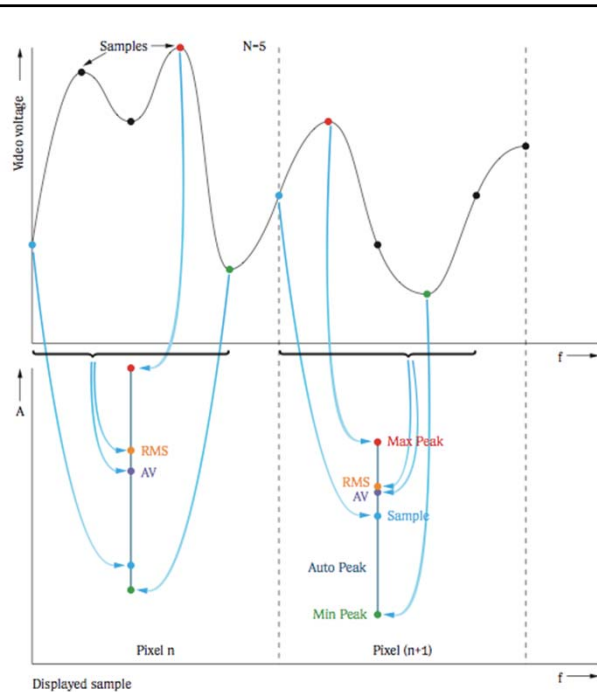
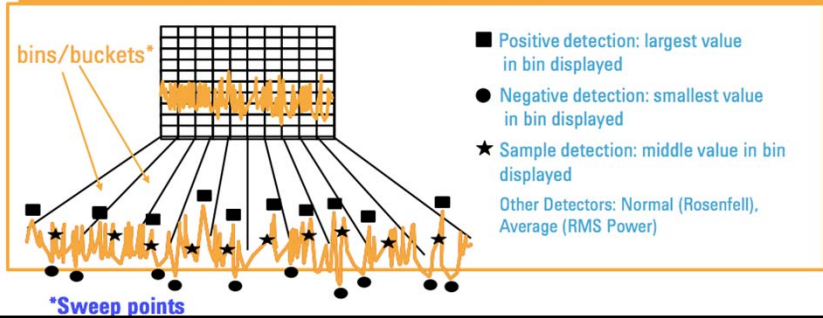
Visualizzazione dei campioni

Envelope Detector and Detection Types

Particularly when large spans are displayed, one pixel contains the spectral information of a relatively large subrange.



Digitally Implemented Detection Types



RMS

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N v_i^2}$$

$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R}$$

AVERAGE

$$V_{AV} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N v_i$$

Scelta del detector

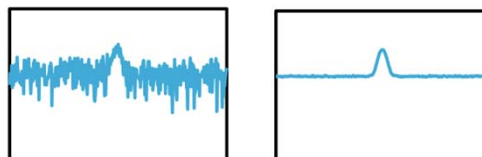
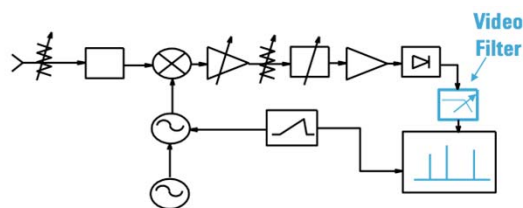
Positive detection mode is typically used when analyzing sinusoids, but is not good for displaying noise, since it will not show the true randomness of the noise.

In **sample detection**, a random value for each bin is produced. This is best for looking at noise or noise-like signals. For burst or narrowband signals, it is not a good mode to use, as the analyzer might miss the signals of interest.

When displaying both signals and noise, the best mode is the **normal mode**, or the rosenfell mode. This is a "smart" mode, which will dynamically change depending upon the input signal. For example, if the signal both rose and fell within a sampling bin, it assumes it is noise and will use pos & neg det alternately. If it continues to rise, it assumes a signal and uses pos peak det.

Video filter

The video filter is a first order low-pass filter after the envelope detector and before the ADC. This filter is used to average or smooth the trace seen on the screen. By changing the video bandwidth (VBW) setting, we can decrease the peak-to-peak variations of noise.



Banda video

- L'amplificatore video posto dopo il rivelatore filtra il segnale ed elimina il rumore casuale sovrapposto al segnale da visualizzare.
- E' possibile variare la banda di questo amplificatore con un comando **VBW (Video Band-Width)**

RBW e VBW

The VBW has to be set as a function of the resolution bandwidth and the specific measurement application.

- For measurements on sinusoidal signals with high SNR a VBW equal to the RBW is usually selected.
- With a low SNR, the display can be stabilized by reducing the VBW.
- To obtain stable and reproducible results of noise measurements, a narrow video bandwidth should be selected.
- Averaging should be avoided when making measurements on pulsed signals. Pulses have a high peak and a low average value. In order to avoid too low display levels, the VBW should be selected much greater than the RBW.

- | | |
|---------|--------------------|
| • Sine | RBW/VBW = 0.3 to 1 |
| • Pulse | RBW/VBW = 0.1 |
| • Noise | RBW/VBW = 10 |

Sensibilità

La sensibilità è una misura della capacità dell'analizzatore di rivelare segnali di ampiezza ridotta.

La principale causa che limita la sensibilità dello strumento è il rumore che può essere quantificato tramite il fattore di rumore F del quale si richiama la definizione:

$$F = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o}$$

La sensibilità di un analizzatore è valutata nella condizione in cui la potenza disponibile del segnale in uscita eguaglia quella del rumore cioè:

$$S_o/N_o = 1$$

Sensibilità

Si può quindi dire che la sensibilità rappresenta la potenza del segnale di ingresso che dà luogo ad un segnale di uscita con la stessa potenza disponibile del rumore:

$$S = FN_i$$

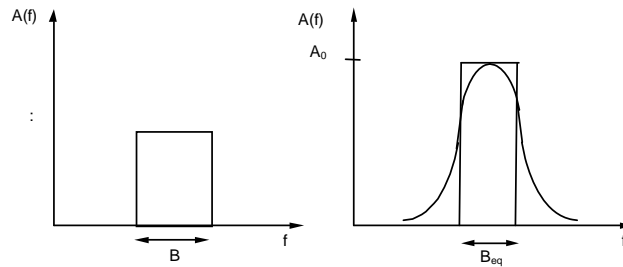
$$N = \frac{\langle V_{ni}^2 \rangle}{4R}$$

$$S = FKTB$$

$$\langle V_{ni}^2 \rangle = 4kTRB$$

Sensibilità

vale nel caso in cui la banda B dell'amplificatore è del tipo di Figura a, nei casi pratici la situazione è invece del tipo di Figura b.



L'amplificazione diminuisce gradualmente quando ci si sposta verso le estremità della banda.

Sensibilità

Nelle applicazioni pratiche si introduce una banda di rumore equivalente (B_{eq}) definita come la larghezza di banda della curva di risposta ideale (rettangolare) di ampiezza A_0 pari a quella massima della curva reale e tale che:

$$A_0^2 B_{eq} = \int_0^{\infty} A(f)^2 df \quad B_{eq} = \int_0^{\infty} \frac{A(f)^2}{A_0^2} df$$

Nei casi pratici risulta B_{eq} circa 1.2 B con B banda a 3 dB dell'amplificatore.

Con questa posizione la sensibilità diviene:

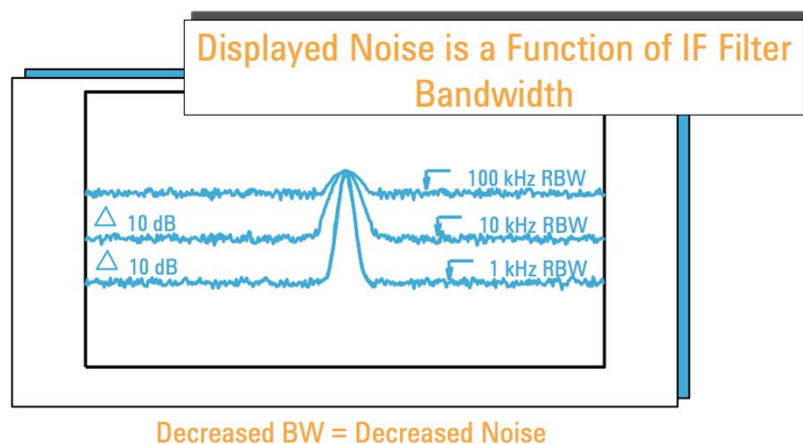
$$S = F k T B_{eq}$$

A temperatura ambiente, con $KT = -163$ dBm/Hz, si hanno valori di S tra -90 e -145 dBm.

displayed average noise level (DANL)

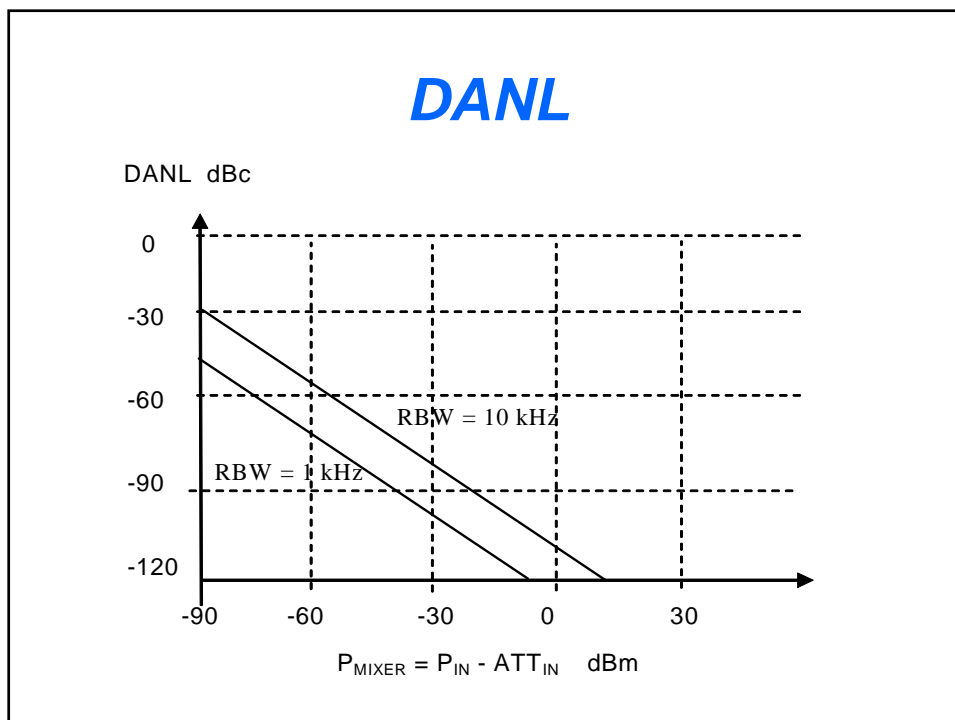
- Un modo per caratterizzare la sensibilità di un analizzatore di spettro è quello di fornire il livello di rumore medio visualizzato (displayed average noise level – DANL) che sarà funzione della RBW.

Sensibilità e RBW



displayed average noise level (DANL)

- Si possono tracciare dei grafici che riportano il DANL in funzione della potenza in ingresso al mixer data dalla differenza tra la potenza del segnale di ingresso ed il livello di attenuazione introdotto dall'attenuatore a scatti. Un grafico di questo tipo è riportato in Figura



Distorsione

Un inconveniente presente negli analizzatori di spettro è dovuto al fatto che dal mixer (armonico) non escono solo i segnali a frequenza

$$f_i = nf_{LO} \pm f_{IF}$$

ma anche altri segnali a frequenze

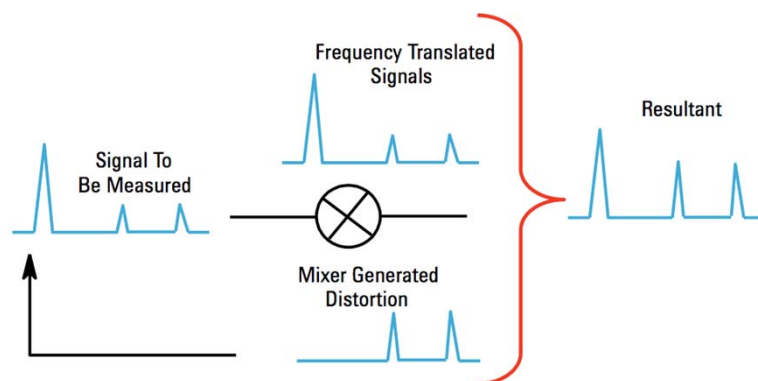
$$mf_i = nf_{LO} \pm f_{IF}$$

che sono dette spurie e che derivano dalle frequenze immagini, ricircolazioni e non linearità di ordine superiore del mixer

Questo inconveniente, si può minimizzare utilizzando dei mixer con una buona reiezione delle spurie e lavorando con segnali di ingresso bassi rispetto al punto di compressione del mixer.

Distorsione

Mixers Generate Distortion

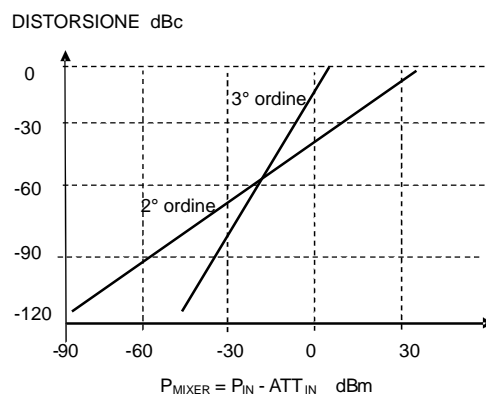


Although distortion measurements, such as third order intermodulation and harmonic distortion, are common measurements for characterizing devices, the spectrum analyzer itself will also produce distortion products, and potentially disturb your measurement.

Distorsione

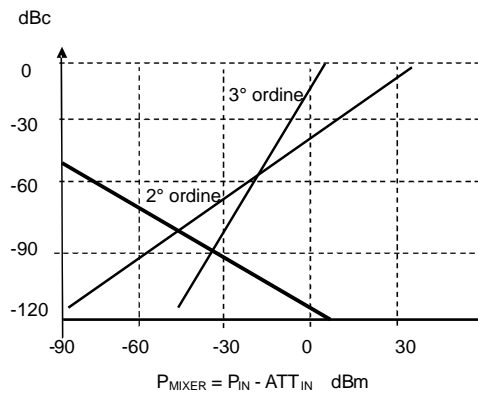
- Tra le varie spurie generate quelle più dannose sono la prima armonica ($m = 2$) e al terza armonica ($m = 3$).
- La potenza di queste armoniche varia con la potenza in ingresso al mixer.
- In particolare, se la potenza del segnale in ingresso si riduce di 1 dB la potenza della seconda armonica si riduce di 2 dB (quindi 1 dB rispetto alla fondamentale) mentre quella della terza armonica si riduce di 3dB (quindi 2 dB rispetto alla fondamentale).
- Questo comportamento è mostrato in Figura.

Distorsione



le distorsioni sono minimizzate se si riduce la potenza in ingresso al mixer. Per questo motivo in ingresso all'analizzatore si trova sempre un attenuatore variabile (in genere a scatti) il cui effetto viene compensato dall'amplificatore IF.

Distorsione



Se si combinano i grafici si ottiene il grafico riportato in Figura. Da questo grafico si evince che se si vogliono effettuare delle misure su di un segnale in ingresso ed in particolare valutare ad esempio le armoniche di questo segnale, occorre che le armoniche generate dal mixer siano sotto il DANL.

Distortion test

Distortion – Internal or External?

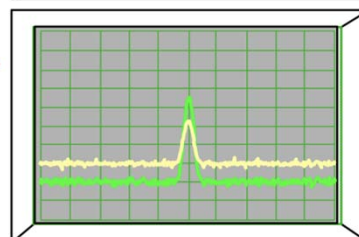
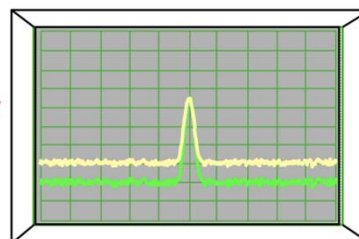
Attenuator Test: Change power to the mixer

- ① Change input attenuator by 10 dB
- ② Watch distortion amplitude on screen

No change in amplitude: distortion is part of input signal (external)

Change in amplitude: at least some of the distortion is being generated inside the analyzer (internal)

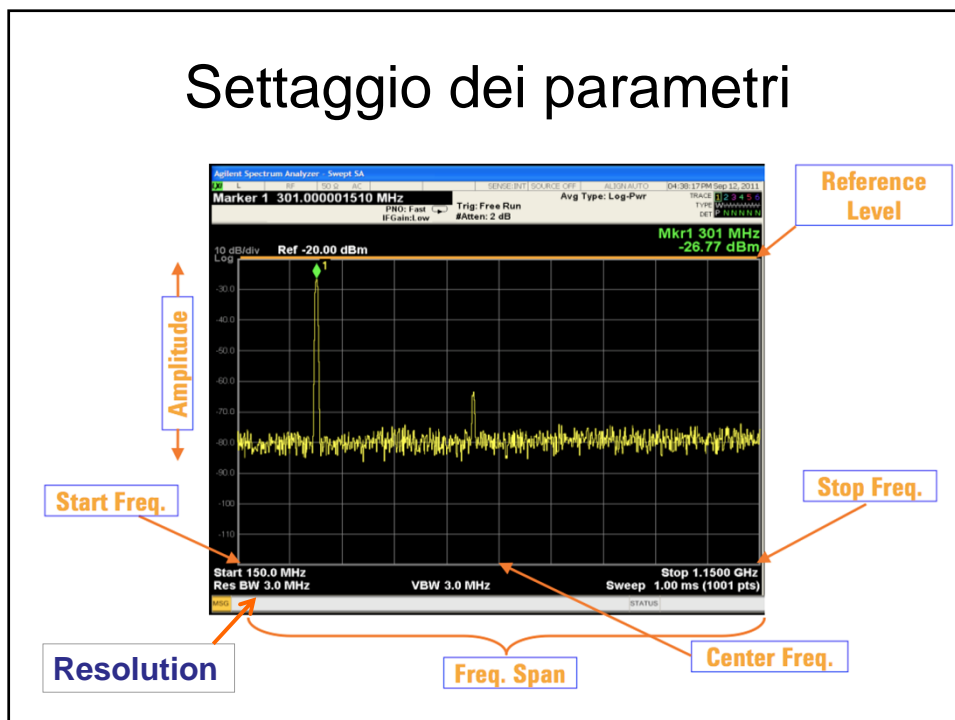
Original distortion signal
Signal with 10dB input attenuation



Monitor

- La CPU dell'analizzatore di spettro che gestisce il processo di campionamento gestisce anche la visualizzazione dei dati.
- In particolare la CPU gestisce la memoria video costituita da una matrice di MxN posizioni corrispondenti ai pixel dello schermo.
- La visualizzazione dello spettro sullo schermo viene realizzata con letture ripetute della memoria.
- Con questa tecnica (raster) è anche possibile riportare sullo schermo le scale e informazioni sulla configurazione dello strumento.

Settaggio dei parametri



Asse orizzontale

- Sull'asse orizzontale dello strumento sono riportate le frequenze che possono essere assegnate individuando la frequenza di inizio (start) e di fine (stop) della scansione ovvero assegnando al frequenza centrale (f_0) ed una banda simmetrica intorno a questa frequenza (frequency span Δf).
- Esiste poi la modalità zero span nella quale il VCO è impostato su di una singola frequenza per cui in uscita si ha la rappresentazione nel dominio del tempo dell'involuppo del segnale. Ad esempio in presenza di una portante modulata in ampiezza se si seleziona una RBW che includa anche le bande laterali è possibile visualizzare la modulazione. Analogamente, in presenza di una portante modulata in frequenza (FM) posizionando f_{LO} sul fronte di salita del filtro IF è possibile visualizzare la modulante. Con alcuni analizzatori di spettro è poi anche possibile effettuare la trasformata di Fourier (FFT) del segnale modulato.

Asse verticale

- La scala verticale può essere tarata in volt per divisione (V/div) o in dB per divisione (dB/div).
- In quest'ultimo caso usualmente il livello 0 dBm è posizionato sull'estremità alta dello schermo
- La scala verticale può essere regolata per valori discreti o con continuità agendo sull'attenuatore variabile, posto all'ingresso dell'analizzatore, o sul guadagno degli amplificatori a frequenza intermedia.

Incertezza

- Con l'analizzatore di spettro si possono effettuare sia misure di frequenza che di ampiezza.
- L'incertezza delle misure di frequenza dipende dall'incertezza sul riferimento di frequenza (VCO). Questa incertezza ha un contributo iniziale più un contributo che dipende dal tempo trascorso dall'ultima taratura dello strumento. Altre cause di incertezza sono associate allo SPAN in frequenza, alla RBW, e ad altri fattori residui. In definitiva lo scarto massimo è dato da:
- $\delta f = \pm (\text{lettura} \times a + s\% \text{ SPAN in frequenza} + b\% \text{ di RBW} + r \text{ Hz})$.
- Per cui, se ad esempio $a = 1.3 \times 10^{-7}$, $s = 1$, $b=15$ e $r = 10$ se si misura un segnale di 2 GHz con uno SPAN di 400 kHz e una RBW = 3 kHz risulta:
- $\delta f = \pm [(2 \times 10^9) \times (1.3 \times 10^{-7}) + 1\% \times 400 \text{ kHz} + 15\% \text{ di } 3 \text{ kHz} + 10 \text{ Hz}]$
 $= \pm (260 + 4000 + 450 + 10) = \pm 4720 \text{ Hz}$
- La misura si scrive: $f = (2.000.000,0 \pm 4,8) \text{ kHz}$.

Incertezza

- Per quello che riguarda le misure di ampiezza, queste si dividono in misure assolute e misure relative.
- Se ad esempio si deve misurare una distorsione armonica di un oscillatore, il valore della seconda o terza armonica va valutato relativamente alla fondamentale.
- In questo caso le principali cause di errore sono la **fedeltà di visualizzazione**, **la risposta in frequenza**, l'attenuatore in ingresso, il livello di riferimento, la banda di risoluzione e la scala del monitor.
- Le prime due intervengono sempre mentre le altre quattro solo se si variano i rispettivi comandi in quanto, in caso contrario il loro effetto si elide.

Incertezza

- L'errore di fedeltà di visualizzazione dipende dall'accuratezza dell'amplificatore logaritmico, del detector e dei circuiti di digitalizzazione.
- L'errore di risposta in frequenza dipende dal fatto che la risposta in frequenza del ricevitore non sarà perfettamente piatta. Questo errore viene usualmente definito come \pm xdB rispetto al valore centrale e quando si fanno misure relative va raddoppiato.
- Le altre cause di errore sono dovute alla risposta in frequenza non piatta dell'attenuatore e del filtro di ingresso, dal guadagno dell'amplificatore IF, dal fatto che variando la RBW varia anche la risposta del filtro e dal fatto che variando la scala di visualizzazione, ad esempio da 10 dB/div a 1 dB/div si introducono degli errori.

Incertezza

- Per quel che riguarda le misure assolute di ampiezza, in realtà anche queste sono delle misure relative al segnale di calibrazione che è presente all'interno di tutti gli analizzatori di spettro.
- Questa sorgente fornisce un segnale di riferimento con assegnata frequenza ed ampiezza (ad esempio 300 MHz, 20 dBm).
- Quindi ci sarà una incertezza connessa all'accuratezza della sorgente di calibrazione. Inoltre, come ci si allontana da questo valore in frequenza o si varia l'ampiezza occorre tener conto di due ulteriori contributi di incertezza.

Incertezza

- Un'altra importante causa di errore è il disadattamento tra la sorgente e l'ingresso dell'analizzatore. Questo disadattamento produce un errore dato da
 - $E(\text{dB}) = -20 \log [1 \pm | \Gamma_S | | \Gamma_{\text{ANA}} |]$.
- Dove Γ_S e Γ_{ANA} sono i coefficienti di riflessione visti all'ingresso della sorgente e dell'analizzatore di spettro.

Incertezza

- Ad esempio se si misura un segnale alla frequenza di 1 GHz con un'ampiezza di -30 dBm,
- in base ai parametri dell'analizzatore (attenuazione, RBW, SPAN, scale) si avrà ad esempio una incertezza di calibrazione pari a ± 0.54 dB a cui va aggiunta la risposta in frequenza ad esempio di ± 0.10 dB e risposta in ampiezza ± 0.36 dB.
- In questo modo si ottiene una incertezza di caso peggiore data da ± 1 dB = 12.2 % (si è trascurata l'incertezza di disadattamento).
- Per cui la misura si scrive: $P = (1,00 \pm 0.13) \mu\text{W}$

Calcolo incertezza standard

Error Calculation for Rohde & Schwarz Spectrum Analyzers					
Inherent errors	unit	s = stand. uncertainty w = worst case	specified error	variance σ_i^2	contribute y = yes, n = no
Absolute error 120 MHz	dB	1 w	2 0.3	0.03	3 y 4
Frequency response	dB	w	0.2	0.01	y
Input attenuator	dB	w	0.2	0.01	y
If gain	dB	w	0.2	0.01	y
Log linearity	dB	w	0.2	0.01	y
Bandwidth switching error	dB	w	0.2	0.01	y
Bandwidth error	%		10.00	0.07	y
Combined variance		$\sigma_{tot}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2$		0.17	
Combined standard uncertainty		$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_{tot}^2}$		0.41	
Total error (95% confidence level)	dB			0.80	5
Total error (99% confidence level)	dB			1.05	
Error due to source mismatch		a = return loss / dB v = VSWR	specified values		
VSWR of SA		6 v	7 3.1		
VSWR of DUT		v	1.57	0.55	
Combined variance		$\sigma_{tot}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2$		0.71	
Combined standard uncertainty		$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_{tot}^2}$		0.85	
Error including source mismatch (95%)	dB			1.66	8
Error including source mismatch (99%)	dB			2.18	