

**CAPITOLO 7****MISURAZIONI NEL DOMINIO DELLA FREQUENZA CON ANALIZZATORE DI SPETTRO**

Si sono viste, nel capitolo precedente, le modalità con le quali è possibile analizzare nel dominio del tempo un generico segnale elettrico mediante l'oscilloscopio digitale.

L'**analizzatore di spettro** è strumento preposto a svolgere le stesse funzioni nel dominio della frequenza. Esso è uno degli strumenti più utili ai fini dell'analisi dei segnali nell'ambito dell'ingegneria.

Gli analizzatori di spettro si dividono in due categorie principali, legate a diverse filosofie operative e costruttive. La prima prevede il trattamento completamente analogica del segnale di ingresso, mentre la seconda campiona il segnale per poi elaborarlo numericamente mediante algoritmi che implementano la Fast Fourier Transform (FFT). Gli analizzatori di spettro, inoltre, si diversificano anche per il tipo di segnale osservato, transitorio o periodico.

Di seguito sono presentate dapprima le soluzioni analogiche, per segnali transitori e/o periodici, e poi quella numerica.

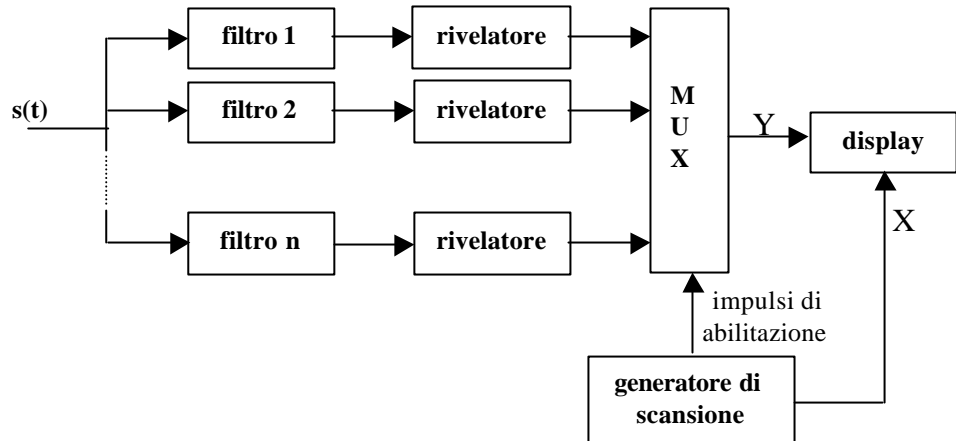
**Analizzatore di spettro real time**

I segnali transitori, in quanto dotati di banda illimitata, sono caratterizzati da un numero teoricamente infinito di componenti spettrali.

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.

Quando si è interessati all'analisi di una componente spettrale ad una certa frequenza è possibile usare un filtro centrato alla frequenza di interesse per recuperare il solo contenuto informativo desiderato. 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.

La soluzione per esaminare contemporaneamente le risposte a più frequenze prende il nome di **analizzatore di spettro real time** (figura 7.1).



- figura 7.1 -

Relativamente a questa soluzione, si osserva che i filtri passa-banda 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.

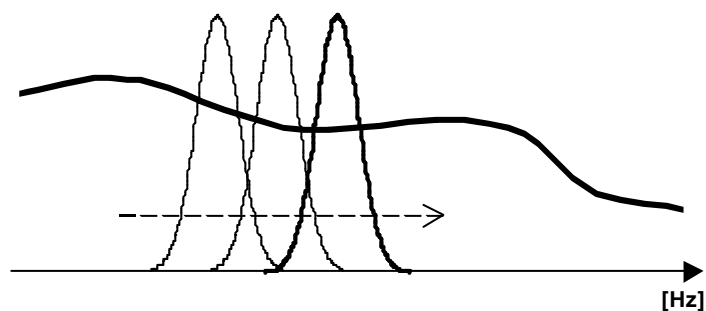
Tuttavia, la richiesta di una sempre maggiore risoluzione spinge verso l'utilizzo di un numero crescente di filtri, di qualità sempre superiore (banda stretta), con conseguente aggravio dei costi dell'analizzatore. Inoltre, i filtri peggiorano in risoluzione all'aumentare della frequenza, cosicché non 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.

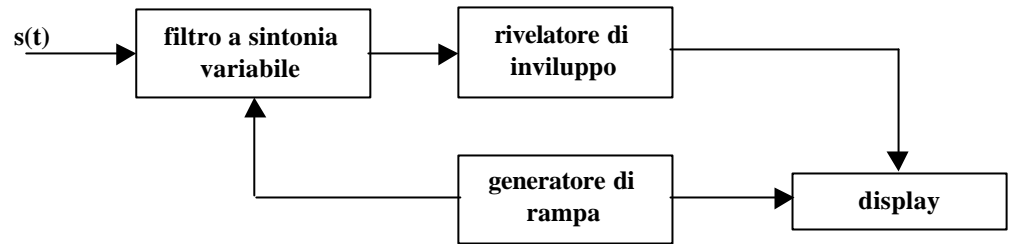
### Analizzatori di spettro sweep-tuned

Per analizzare lo spettro di un segnale periodico una prima soluzione proposta è quella basata sul **filtro a sintonia variabile** (figura 7.2). Quest'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 7.3. Essa mostra, tra l'altro, la presenza del blocco "rivelatore di involuppo", preposto al recupero dell'involuppo 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  $f_{0min}$  a  $f_{0max}$ , dove  $f_0$  è la frequenza a cui è centrato il filtro.



- figura 7.2 -



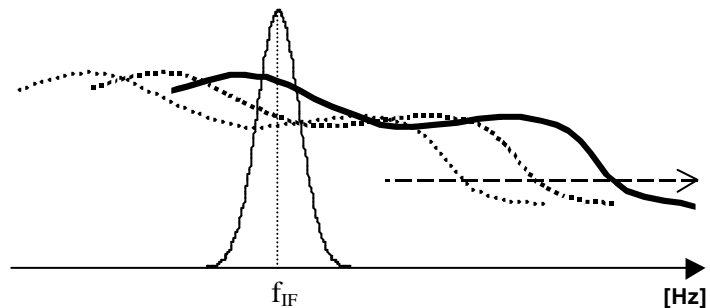
- figura 7.3 -

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.

### Analizzatori di spettro a supereterodina

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

Questa soluzione prevede un filtro passa-banda 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, come riportato in figura 7.4. 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.



- figura 7.4 -

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

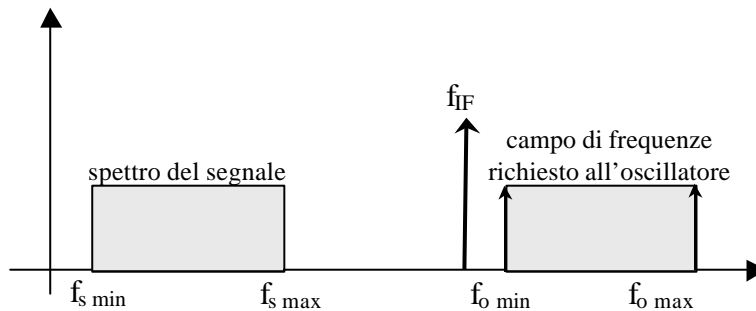
- $f_{o\ min}$  è quel valore di frequenza che trasla a  $f_{IF}$  la componente a più bassa frequenza dello spettro del segnale;
- $f_{o\ max}$  è quel valore di frequenza che trasla a  $f_{IF}$  la componente a più alta frequenza superiore dello spettro del segnale.

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

$$f_s = f_o - f_{IF} \quad (7.1)$$

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 7.5.



- figura 7.5 -

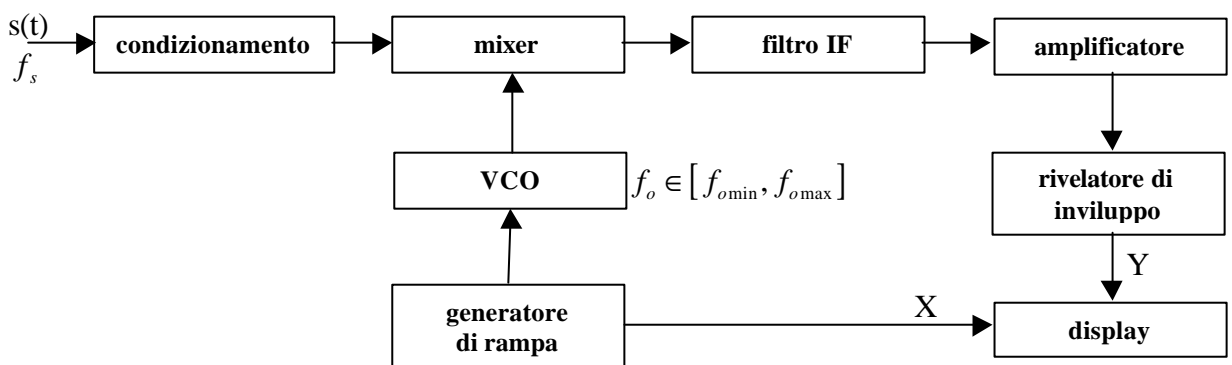
Lo schema a blocchi dell'analizzatore di spettro a supereterodina è riportato in figura 7.6.

Sia, per semplicità,  $s(t) = S_M \cos(2\pi f_s t)$  il segnale di ingresso da analizzare. In uscita al VCO è presente un segnale,  $v(t) = V_M \sin(2\pi f_o t)$ , 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  $f_o + f_s$ .

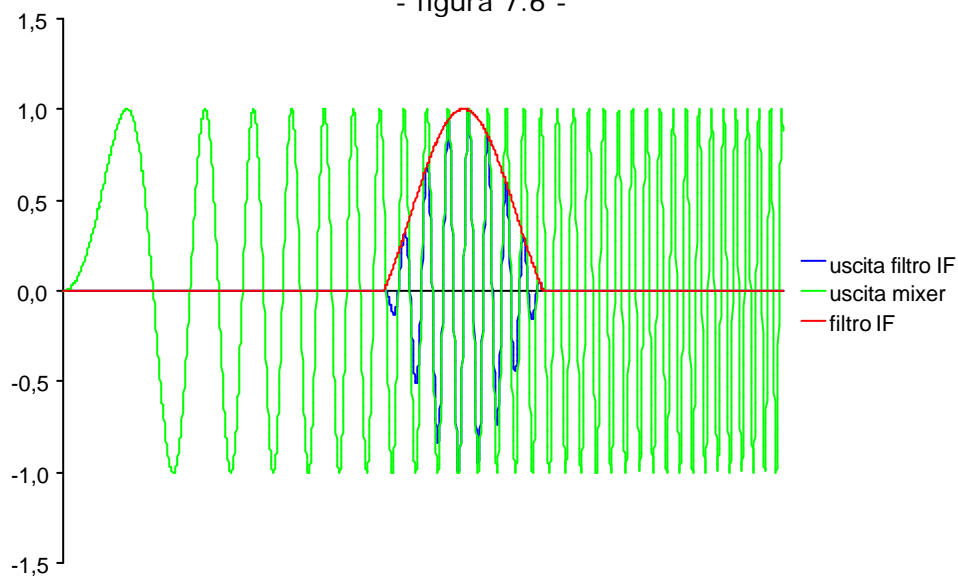
Per gli istanti  $t$  per cui risulta  $f_o \pm f_s \neq f_{IF}$ , non viene visualizzata alcuna traccia sul display. Viceversa, se per un certo istante  $t^*$  risulta  $f_o \pm f_s = f_{IF}$ , allora in corrispondenza di tale istante viene visualizzato il segnale in uscita al rivelatore di involuppo.

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 composto, la visualizzazione dei diversi toni avviene in corrispondenza di un insieme di  $f_o$  appartenenti a  $[f_{o\min}, f_{o\max}]$ . La figura 7.7 descrive qualitativamente il funzionamento del circuito di figura 7.6, 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 rivelatore di involuppo, 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.



- figura 7.6 -



- figura 7.7 -

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. è possibile scandire un ampio campi di frequenze.

### La frequenza immagine

Per un dato valore di  $f_o$ , più componenti spettrali del segnale possono essere traslate a  $f_{IF}$ . Ciò è vero in virtù del fatto che la relazione (7.1) si specializza, nel caso più generale, in

$$f_{IF} = |mf_o - nf_s| \quad (7.2)$$

Particolarmente significativo è il caso della frequenza immagine. Data una componente spettrale di frequenza  $f_{x1}$ , e fissato il valore di  $f_o$  che soddisfa le (7.1), ovvero

$$f_{IF} = f_o - f_{x1} \quad (7.3)$$

può essere, infatti, presente nel segnale una componente a frequenza  $f_{x2}$  (immagine) tale che:

$$f_{IF} = f_{x2} - f_o \quad (7.4)$$

In questo caso, l'uscita del filtro  $f_{IF}$ , nell'istante di tempo in cui la frequenza del segnale fornito dal VCO è pari a  $f_o$ , risulta somma di due contributi: quello relativo alla

componente di interesse del segnale e quello relativo alla frequenza immagine. L'informazione estratta dal filtro può, quindi, essere poco significativa.

Siano note, ad esempio, le seguenti informazioni:

$$f_{IF} = 1\text{MHz} \text{ e } f_o = 1,1\text{MHz}$$

con  $f_{IF}$  frequenza di centro immagine e  $f_o$  una frequenza dell'oscillatore locale.

In tal caso le frequenze

$$f_{s1} = 100\text{kHz} \text{ e } f_{s2} = 2,1\text{MHz}$$

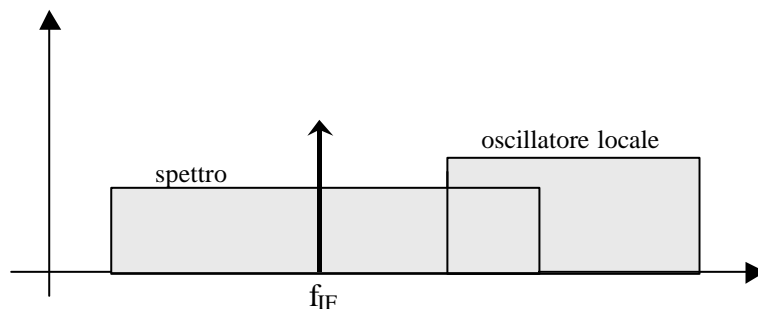
danno luogo contemporaneamente alla stessa frequenza intermedia.

La gamma di frequenze immagine è collocata come in figura 7.9 e raccoglie tutte le frequenze che soddisfano la relazione:

$$f_{IM} = f_o + f_{IF} \quad (7.5)$$

al variare della frequenza dell'oscillatore locale da  $f_{o\ min}$  a  $f_{o\ max}$ .

Occorre dunque evitare che si verifichi una situazione come quella rappresentata in figura 7.8, sicura causa di sovrapposizione di repliche in frequenza.



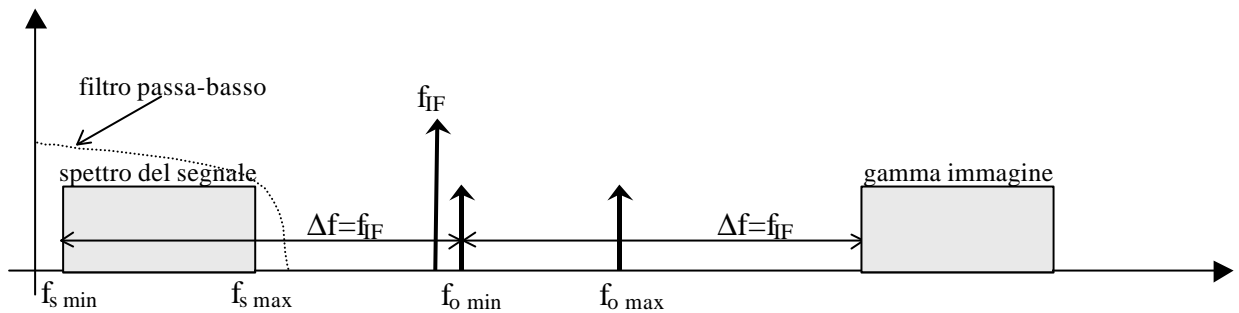
- figura 7.8 -

È cura del progettista, quindi, garantire che lo spettro del segnale di ingresso sia confinato in una certa banda, che la frequenza intermedia sia posta ad un valore maggiore del limite superiore dello spettro del segnale e che il campo di frequenze



dell'oscillatore locale sia localizzato al di sopra della  $f_{IF}$ , così come nelle figure 7.5 e 7.9.

Da ciò la necessità di un filtraggio passa-basso in ingresso (una delle peculiarità del blocco di condizionamento).



- figura 7.9 -

### Specifiche di un analizzatore di spettro a supereterodina

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

$$S = \frac{B_{-60dB}}{B_{-3dB}} \quad (7.6)$$

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.

### I decibel

Spesso l'amplificatore a valle del filtro  $IF$  di figura 7.6 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  $P_1$  e  $P_2$ , il suo valore espresso in decibel è dato da:

$$A_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \quad (7.7)$$

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

$$A_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{V_1^2 R}{R V_2^2} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{V_1}{V_2} \right) \quad (7.8)$$

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:

$$P_{dBm} = 10 \log_{10} \left( \frac{P}{1mW} \right) \quad (7.9)$$

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:

$$A_{dBV} = 20 \log_{10} \left( \frac{A}{1V} \right) \quad (7.10)$$

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 dB T (dB tesla) per una misura di campo elettromagnetico in riferimento ad 1T, oppure un dB A (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.

Infine, è possibile effettuare, specificando il valore di una resistenza  $R$ , una conversione dBm-dBV. La legge di trasformazione è la seguente:

$$P_{dBm} = V_{dBV} + 10 \log \left( \frac{1}{0,001 \cdot R} \right) \quad (7.11)$$

Ad esempio, per  $R=150\Omega$  risulta:

$$P_{dBm} = V_{dBV} + 8,24$$