

IMPULSE DISTURBANCES: THE RESPONSE OF SPECTRUM ANALYZER

Carlo Carobbi⁽¹⁾, Marco Cati⁽²⁾, Carlo Panconi⁽³⁾

⁽¹⁾Dip. di Elettronica e Telecomunicazioni, Università di Firenze, Via S. Marta, 3 – 50139 Firenze

⁽²⁾Ricerca e Sviluppo, Esaote S.p.A., Via di Caciolle, 15 – 50127 Firenze

⁽³⁾Istituto Tecnico Industriale Statale "Silvano Fedi", Via Dei Panconi, 39 – 51100 Pistoia

marco.cati@esaote.com

1. ABSTRACT

Disturbances are classified as sinusoidal or impulse according to their time-domain wave-shape, and narrow-band or wide-band depending on the fact that their spectrum is narrow or wide with respect to the bandwidth of the receiver or victim. Sources of impulse disturbances are (the list is incomplete) switching loads, switching power supplies, digital circuits, electrostatic discharge, lightning. Hence in electromagnetic compatibility (EMC) measurements it frequently occurs that an impulse disturbance voltage is present at the input of a spectrum analyzer (or EMI receiver) coming from the output of an antenna, artificial mains network or coupling network. The scope of this article is to analyze the response of spectrum analyzers to impulse disturbances. We will see that when the rate of occurrence of the impulse is low with respect to the reciprocal of the bandwidth of the receiver what is actually measured is proportional to the voltage spectral density of the disturbance. The constant of proportionality is called equivalent impulse bandwidth. Measurement methods of the impulse bandwidth are here described. The concepts outlined in this article are relevant to impulse measurements in general, independently of the specific application (an important one is the measurement of modern digital communication signals).

2. BANDA EQUIVALENTE IMPULSIVA

Si analizza qui il caso in cui si presenta all'ingresso di un analizzatore di spettro un disturbo impulsivo a larga-banda. Consideriamo inizialmente il caso di un impulso singolo, cioè di un evento che avviene una volta sola. Ci chiediamo: cosa si vede sul display di un analizzatore di spettro? Ai fini di questa discussione possiamo assumere che un analizzatore di spettro sia composto dagli elementi rappresentati in Fig. 1 [1].

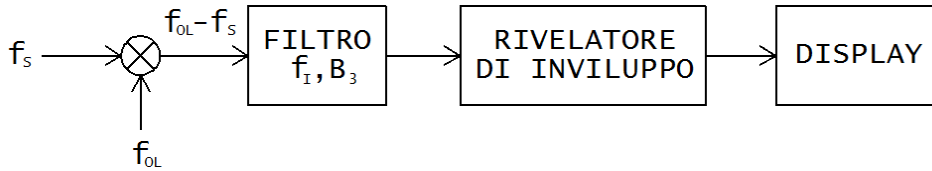


Figura 1: Blocchi essenziali dell'analizzatore di spettro.

Si immagini, per il momento, che all'ingresso sia applicata una sinusoide a frequenza f_s . I blocchi essenziali sono: un mixer che mescola segnale con l'oscillatore locale a frequenza f_{OL} , un filtro passa-banda di banda B_3 (detta "banda di risoluzione") alla frequenza intermedia f_I , un rivelatore di inviluppo ed infine il display. Il compito del mixer è di traslare la frequenza del segnale per tramite della frequenza dell'oscillatore locale. In uscita dal mixer si hanno i prodotti di mescolazione a frequenza $nf_{OL} \pm f_s$ dove n è intero. L'unico prodotto di mescolazione su cui è possibile avere la sintonia è quello corrispondente a $n = 1$ e segno $-$: infatti un filtro passa-basso che precede il mixer (non rappresentato in Fig. 1) fa sì che giungano al mixer solo le frequenze per cui $f_s < f_I$, inoltre l'oscillatore locale ha frequenza $f_{OL} > f_I$. Si ha allora la sintonia quando la frequenza dell'oscillatore locale è tale che $f_{OL} - f_s = f_I$. Se il segnale ha ampiezza piccola rispetto a quella dell'oscillatore locale il prodotto di mescolazione $f_{OL} - f_s$ riproduce fedelmente il segnale applicato all'ingresso (ed anche una sua eventuale modulazione di ampiezza e fase) a parte la traslazione di frequenza ed una attenuazione, detta perdita di conversione del mixer. Ora, tutto va come se, anziché traslare la frequenza f_s del segnale su f_I , si traslasse la frequenza centrale del filtro sulla frequenza di sintonia $f_{OL} - f_I$. Nell'impiego più tipico l'oscillatore locale effettua una scansione automatica in modo da scandire un intervallo di frequenze di sintonia stabilito dall'utilizzatore. Si può allora immaginare che il filtro abbia frequenza centrale variabile e uguale alla frequenza sulla quale si trova sintonizzato, istante per istante, l'analizzatore di spettro. Veniamo adesso al caso in cui il segnale, anziché essere una sinusoide a frequenza f_s , è un impulso. Ciò che si vede sul display non è altro che l'inviluppo della risposta impulsiva del filtro a frequenza intermedia. Supponiamo, per il momento, che l'impulso sia ideale, ossia di durata infinitesima e area A . Si definisce banda equivalente impulsiva B_{imp} il rapporto fra il picco V_{pk} dell'inviluppo della risposta impulsiva e il doppio dell'area dell'impulso, ossia

$$B_{imp} = \frac{V_{pk}}{2A}. \quad (1)$$

Il filtro a frequenza intermedia dell'analizzatore di spettro è approssimativamente gaussiano. Per un filtro gaussiano a fase lineare si ha $B_{imp} = \sqrt{\pi/2 \log 2} \approx 1,505 B_3$.

Nel caso di impulso reale, cioè di durata breve ma non infinitesima, allora vale che

$$V_{pk} \approx 2S(f_{OL} - f_I) B_{imp}, \quad (2)$$

dove $S(f_{OL} - f_I)$ è l'ampiezza dello spettro (trasformata di Fourier) dell'impulso, $S(f)$, valutata alla frequenza alla quale si trova sintonizzato l'analizzatore di spettro nell'istante in cui l'impulso gli si presenta all'ingresso. Nella (2) l'approssimazione è tanto migliore quanto più breve è la durata dell'impulso rispetto alla durata della risposta del filtro all'impulso stesso.

Riassumendo, ciò che si vede sul display di un analizzatore di spettro quando all'ingresso si presenta un impulso singolo è l'involuppo della risposta impulsiva del filtro a frequenza intermedia. Il picco dell'involuppo è proporzionale al doppio dell'ampiezza dello spettro dell'impulso all'ingresso. Lo spettro è valutato alla frequenza alla quale è sintonizzato l'analizzatore di spettro nell'istante in cui si presenta l'impulso. La costante di proporzionalità è la banda equivalente impulsiva.

Si conclude allora che, nel caso di impulso singolo, l'informazione che si ricava dal display dell'analizzatore di spettro è un valore (un campione) dell'ampiezza dello spettro dell'impulso. Immaginiamo ora che l'impulso non sia singolo ma si ripeta con cadenza (costante o casuale) lunga rispetto alla durata della risposta all'impulso del filtro a frequenza intermedia, cioè rispetto a $1/B_3$. In questo caso il filtro a frequenza intermedia risponde a ciascun impulso come se fosse singolo. Se si impiega la funzione max-hold della traccia ciascuna risposta viene trattenuta dal display e, se attendiamo un tempo sufficiente, sul display si formerà l'andamento dello spettro dell'impulso all'ingresso. Si presume, come di solito avviene, che non ci sia sincronismo fra la scansione dell'oscillatore locale e la cadenza degli impulsi per cui quando gli impulsi si presentano all'ingresso dell'analizzatore di spettro questo sia sintonizzato su una frequenza sempre diversa.

Nel caso invece di impulso periodico, ripetuto con cadenza breve (e costante) rispetto a $1/B_3$, sul display dell'analizzatore di spettro appaiono le righe spettrali (serie di Fourier) dell'impulso periodico. La seguente importante relazione lega le righe della serie di Fourier, S_k , con la trasformata di Fourier dell'impulso singolo, $S(f)$, e la f_R , frequenza di ripetizione degli impulsi:

$$S_k = 2 f_R S(k f_R) \quad (3)$$

La (3) ci dice che le righe della serie di Fourier hanno ampiezza proporzionale al prodotto fra la frequenza di ripetizione degli impulsi e lo spettro dell'impulso singolo valutato alla frequenza $k f_R$, dove k è un intero.

3. MISURA DELLA BANDA EQUIVALENTE IMPULSIVA

Sono disponibili diverse tecniche di misura della banda equivalente impulsiva. Una prima tecnica consiste nell'applicare all'ingresso dell'analizzatore di spettro un impulso di spettro noto, ad esempio un impulso rettangolare di area A e durata τ per cui

$$S(f) = A \frac{|\sin(\pi f \tau)|}{\pi f \tau}. \text{ L'impulso si deve ripetere con frequenza } f_R \text{ piccola rispetto a } B_3 \text{ (ad esempio } f_R < B_3/10 \text{)}. \text{ Si avrà cura di}$$

sintonizzare l'analizzatore di spettro su una frequenza f alla quale lo spettro dell'impulso è relativamente piatto ($\pi f \tau < 1$) ma sufficientemente distante dalla gonna del filtro di risoluzione centrato attorno a $f = 0$ Hz (ad esempio $f > 3B_3$). A questo punto noto $S(f)$ e noto V_{pk} , in base alla lettura del display (scala lineare oppure logaritmica) si ricava, usando la (2), B_{imp} . La tecnica può essere migliorata per ridurre l'incertezza sulla determinazione di B_{imp} dovuta all'incertezza assoluta della lettura di V_{pk} . E' sufficiente per questo applicare all'ingresso dell'analizzatore di spettro una sinusoide alla frequenza f di ampiezza tale da dare la stessa lettura V_{pk} sul display dell'analizzatore di spettro. Si sostituisce allora a V_{pk} , nella (2), l'ampiezza di questa sinusoide che può essere determinata a parte con grande accuratezza (ad esempio con un misuratore di potenza RF). Potrà essere necessario anche un buon attenuatore a scatti per raggiungere il livello di V_{pk} , in genere molto piccolo. La tecnica può prevedere l'impiego di un generatore sinusoidale che consente la modulazione impulsiva della portante RF. E' utile per le bande di risoluzione più ampie, quando è di interesse verificare la risposta all'impulso dell'analizzatore di spettro a frequenze di sintonia elevate.

Una seconda tecnica prevede l'impiego di un generatore di forme d'onda in grado di generare l'impulso con frequenza di ripetizione variabile in un intervallo relativamente ampio. Si procede così: si sceglie una frequenza di ripetizione f_R grande rispetto a B_3 (ad esempio $f_R > 10B_3$) e si sintonizza l'analizzatore di spettro su una frequenza f che coincide con un'armonica della serie di Fourier, $f = k f_R$, e soddisfa le condizioni viste precedentemente ($3B_3 < f < 1/\pi\tau$). Si legge l'ampiezza dell'armonica S_k . Mantenendo la stessa frequenza di sintonia si riduce la frequenza di ripetizione f_R fino ad un valore piccolo rispetto a B_3 ($f_R < B_3/10$). A questo punto si legge V_{pk} . In base alle equazioni (2) e (3) abbiamo che $S_k/V_{pk} = f_R/B_{imp}$. Di fatto la determinazione di B_{imp} si ottiene per tramite di una misura di attenuazione ($\text{Attenuazione} = S_k/V_{pk}$) e dal valore noto di f_R . Per contenere l'incertezza di misura di deve aver cura di non cambiare le impostazioni dell'analizzatore di spettro nelle due misure. Per questo conviene usare la scala logaritmica visto che l'attenuazione sarà relativamente alta (circa 10).

Una terza tecnica si basa ancora su un metodo relativo. E' stata recentemente individuata [2] una doppia disuguaglianza sulla banda equivalente impulsiva. La banda equivalente impulsiva è compresa fra un limite inferiore ed uno superiore. Il limite inferiore è dato dal reciproco dell'area dell'involuppo della risposta all'impulso. Nel calcolo l'involuppo deve avere picco normalizzato a 1 (cioè deve essere diviso per il valore di picco V_{pk}). Il limite superiore è invece determinato dall'integrale della ampiezza della risposta in frequenza. Anche la risposta in frequenza deve avere picco normalizzato a 1. In genere gli analizzatori di spettro non hanno sufficiente risoluzione orizzontale, in termini di tempo, per una corretta ricostruzione dell'involuppo della risposta all'impulso a partire dai campioni. Per ottenere l'involuppo della risposta all'impulso occorre perciò impiegare un oscilloscopio collegato a valle del filtro a frequenza intermedia oppure a valle del rivelatore d'involuppo. Generalmente una o entrambe le uscite sono disponibili sul pannello posteriore dell'analizzatore di spettro. Non è necessario che le uscite siano tarate visto che è sufficiente l'andamento normalizzato. L'andamento della ampiezza della risposta in frequenza può essere invece ottenuto scaricando la traccia sul display

mediante collegamento con PC all'apposita interfaccia. Il calcolo degli integrali può essere semplicemente svolto numericamente, applicando ad esempio la regola dei trapezi.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Agilent Technologies, "Application Note 150 - Spectrum Analysis Basics", Aug. 2, 2006.
- [2] Carlo F.M. Carobbi, Marco Cati, Carlo Panconi, "A Double Inequality for Equivalent Impulse Bandwidth", in stampa su IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility.