

Applicazione della norma CEI 211_7B per la misura con analizzatore di spettro del campo elettrico prodotto da impianti radar di potenza

A.Barellini¹, L.Bogi², G.Licitra³, A.M.Silvi², A.Zari²

¹Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana – Dip. Pisa – via V.Veneto, 27 – Pisa

²Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana – Dip. Livorno – via Marradi, 114 – Livorno

³Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana – Direz. Tecnica– via Porpora, 22 - Firenze

Riassunto

Il Comitato Elettrotecnico Italiano ha pubblicato ad inizio 2008 un'appendice alla norma tecnica 211-7 allo scopo di fornire una metodologia per la misura delle grandezze fisiche correlate ai campi elettromagnetici emessi dagli impianti radar di potenza. Si riportano i risultati dell'applicazione della metodologia indicata nel caso di utilizzo di una catena strumentale in banda stretta dotata di analizzatore di spettro supereterodina. Le misure sono state effettuate sia in laboratorio che in situ in presenza di segnali prodotti da un radar utilizzato per il controllo del traffico aereo.

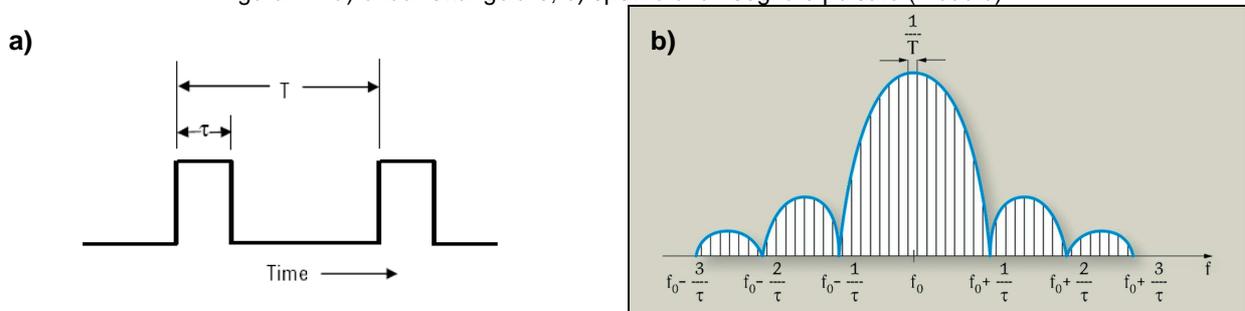
INTRODUZIONE

Ad inizio 2008, il Comitato Elettrotecnico Italiano ha pubblicato l'Appendice B della norma tecnica 211-7 [1] dal titolo "Misura e valutazione del campo elettromagnetico emesso dagli impianti radar di potenza" con lo scopo di fornire una metodologia per la misura delle grandezze correlate ai campi elettromagnetici emessi da tale tipologia di impianti. Nell'Appendice B vengono indicate le metodiche da utilizzare per la misura con tre differenti tipologie di strumentazione: misuratore a banda larga, oscilloscopio e catena strumentale in banda stretta dotata di analizzatore di spettro.

IL SEGNALE RADAR E LA MISURA CON ANALIZZATORE DI SPETTRO

Il radar rappresenta l'esempio più significativo di sorgente pulsata di campi elettromagnetici. In tali sorgenti la potenza emessa viene modulata con un'onda rettangolare caratterizzata da un tempo di accensione τ e da un periodo di ripetizione T (fig.1) [2][3]. Nel caso dei radar per il controllo del traffico aereo, la sorgente trasmette il segnale portante (tipicamente nella banda delle radiofrequenze o delle microonde) durante il tempo di accensione τ per poi porsi in ricezione allo scopo di rilevare l'eco prodotta da eventuali oggetti riflettenti che vengano a trovarsi nella direzione di propagazione del fascio emesso.

Figura 1 – a) onda rettangolare; b) spettro di un segnale pulsato (modulo)



τ = durata dell'impulso, T = periodo di modulazione

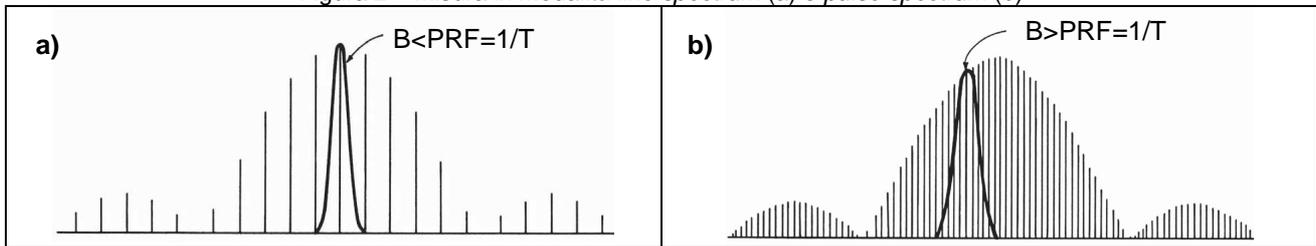
Nel dominio della frequenza, lo spettro di un segnale modulato con un'onda rettangolare è costituito da un insieme discreto di righe equispaziate tra loro di una distanza pari a $1/T$ (tale quantità è generalmente indicata con il termine PRF – Pulse Repetition Frequency). Lo spettro (fig. 1b) presenta un massimo in corrispondenza della frequenza della portante f_0 di ampiezza pari a τ/T volte quella della portante non modulata, dove il rapporto τ/T è detto *duty cycle* del segnale modulato. Per un impulso perfettamente rettangolare, l'ampiezza delle righe spettrali diminuisce con l'allontanarsi dalla frequenza della portante

secondo la legge $\tau \frac{\sin\left(\frac{n\pi\tau}{T}\right)}{T \frac{n\pi\tau}{T}}$. Lo spettro presenta dei nulli in corrispondenza dei valori di frequenza la cui

distanza dalla portante f_0 è pari a multipli dell'inverso della durata dell'impulso τ . La fig. 1b riporta lo spettro del segnale modulato come visualizzato da un analizzatore di spettro, in grado di rivelare l'ampiezza ma non la fase delle singole componenti spettrali. Per la misura dei segnali radar con analizzatore di spettro, in letteratura [3][4][5] vengono tipicamente distinte due modalità di risposta dell'analizzatore in dipendenza del rapporto tra la larghezza a 3 dB del filtro IF (generalmente indicato come Resolution Bandwidth o RBW)

dell'analizzatore stesso e la spaziatura tra le righe dello spettro pari a $1/T$. Tali modalità vengono rispettivamente dette *line spectrum* e *pulse spectrum*.

Figura 2 – Misura in modalità *line spectrum* (a) e *pulse spectrum* (b)



Nel caso la larghezza a 3 dB del filtro IF risulta inferiore al PRF ($RBW < PRF$) l'analizzatore opera in modalità *line spectrum*. In queste condizioni, l'analizzatore è in grado di risolvere e di visualizzare sul display le singole componenti spettrali (fig. 2a). In questo caso, come anche indicato dalla norma CEI 211-7B, il valore del campo elettrico di picco (ovvero quello prodotto durante il tempo di accensione τ) determinato dal radar nel punto di misura può essere ricavato dal valore in dBm, ottenuto sull'analizzatore in corrispondenza della componente alla frequenza portante f_0 , sommando ad esso il fattore di desensibilizzazione $\alpha_L[dB] = 20 \log_{10} \frac{\tau}{T}$. Quando la larghezza del filtro RBW è uguale o maggiore della distanza $1/T$ tra le righe dello spettro ($RBW \geq PRF$) quanto visualizzato sul display dell'analizzatore corrisponde ad una rappresentazione degli impulsi del radar nel dominio del tempo. Tale modalità di risposta è detta *pulse spectrum* (fig. 2b). La norma CEI 211-7B distingue a sua volta, all'interno di tale modalità di risposta, la condizione in cui la larghezza del filtro IF sia inferiore o superiore a $2/\tau$ ovvero alla porzione di spettro contenuta tra i primi nulli a cavallo della frequenza f_0 della portante. Nel caso $RBW > 2/\tau$, il valore letto sul display dell'analizzatore corrisponde proprio al valore di picco dell'impulso. Diversamente, nel caso $PRF < RBW < 2/\tau$, dal valore letto sul display si potrà risalire al valore di picco sommando ad esso il fattore di desensibilizzazione $\alpha_P[dB] = 20 \log_{10} \tau * B_{imp}$ dove B_{imp} è l'effettiva *impulse bandwidth* del filtro IF [4][6] legata alla larghezza del filtro dalla relazione $B_{imp} = k * RBW$. La norma CEI 211-7B non consiglia l'applicazione di quest'ultima metodica per la misura a causa della difficoltà di conoscere con precisione il valore di k corrispondente a ciascun filtro RBW dell'analizzatore. In [4] si individuano intervalli di applicabilità delle diverse metodiche in alcuni casi differenti da quelli indicati nella norma CEI. Nella modalità *pulse spectrum*, infatti, si indica in $1/\tau$ il valore della RBW sopra il quale si ottiene direttamente il valore di picco dell'impulso mentre, nella medesima modalità, si ritiene applicabile la correzione con il fattore di desensibilizzazione α_P per valori della RBW inferiori a $0.2/\tau$. Nel presente lavoro sono stati indagati i risultati che si ottengono con un analizzatore di spettro supereterodina al variare della larghezza del filtro IF al fine di confrontare quanto ottenuto con quanto atteso in base alla norma CEI nelle diverse modalità. Le misure sono state effettuate sia in laboratorio in presenza di un segnale RF modulato con un'onda rettangolare sia *in situ* in presenza di segnali prodotti da un radar di potenza per il controllo del traffico aereo.

MISURE IN LABORATORIO: METODOLOGIA E RISULTATI

Le misure sono state effettuate con un analizzatore di spettro Agilent ESA mod. E4402B collegato, per mezzo di un cavo coassiale, all'uscita di un generatore di segnali a radiofrequenza Agilent mod. E4438C. Il generatore permette di produrre un segnale a radiofrequenza modulato in ampiezza per mezzo di un'onda rettangolare in cui può essere fissata la durata dell'impulso τ (a partire da un valore minimo di 9 μs) ed il periodo T (a partire da 200 μs). Per gli analizzatori di spettro Agilent ESA, il valore di k è reperibile in letteratura ed è pari a 1.617 [4]. Esso risulta relativamente indipendente dal filtro RBW e dalla forma dell'impulso. E' possibile pertanto, per ogni valore della RBW, calcolare il fattore di desensibilizzazione α_P e pertanto confrontare, anche in modalità *pulse spectrum*, i valori misurati sperimentalmente con quelli attesi.

Una volta determinato, per mezzo dell'analizzatore, il valore della potenza P_{OFF} ricevuta nel caso di segnale a radiofrequenza non modulato, sono stati misurati i valori letti sull'analizzatore in corrispondenza della frequenza della portante f_0 al variare dell'ampiezza del filtro RBW per valori compresi tra 1 kHz e 1 MHz. Durante le misure il valore della VBW è stato posto pari a $10 * RBW$ come indicato dalla norma CEI 211-7B (ad eccezione del valore $RBW = 1$ MHz, essendo il valore massimo disponibile per il filtro $VBW = 3$ MHz). Il tempo di SWEEP utilizzato è stato pari ad 1 s, la banda di frequenza visualizzata (SPAN) pari a 500 kHz ed il detector in modalità PEAK. Le misure sono state eseguite al variare dei parametri dell'onda rettangolare di modulazione. Dapprima sono state effettuate misure mantenendo costante la durata τ dell'impulso (pari a 12 μs e corrispondente ad un valore $1/\tau \approx 83$ kHz) e facendo variare il tempo di

ripetizione T (tra 200 μ s e 10 ms per cui 100 Hz \leq PRF \leq 5kHz). In fig. 3a è riportato il grafico che riporta i valori ottenuti per la differenza Δ tra il valore misurato sull'analizzatore di spettro in corrispondenza della frequenza della portante f_0 ed il valore della potenza P_{OFF} misurata in precedenza per la portante non modulata. Le curve ottenute rispecchiano quanto atteso. Ai punti ottenuti è stata sovrapposta una retta avente pendenza di 10 dB/decade a dimostrazione della linearità di risposta per valori PRF $<$ RBW $<$ 0.2/ τ .

Figura 3 : Risultati ottenuti al variare della durata del periodo T ($\tau=12\mu$ s)

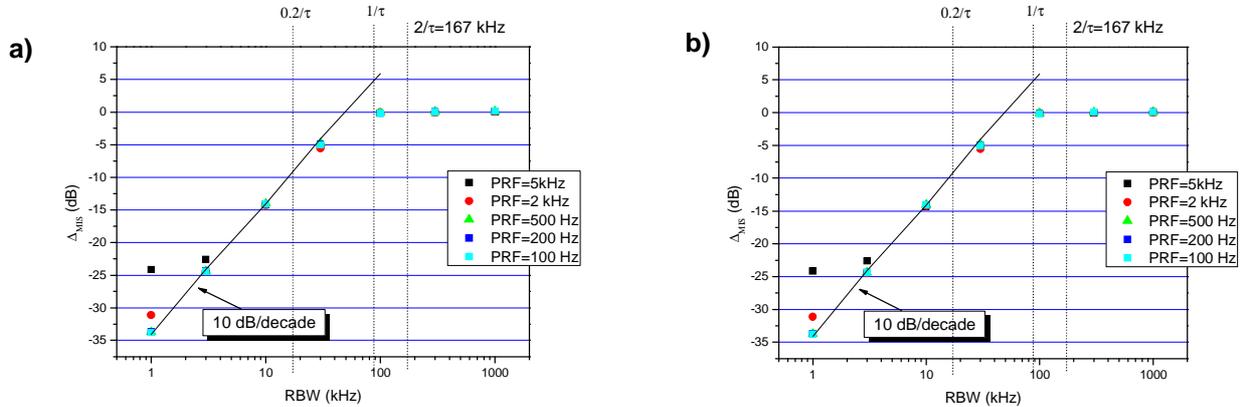
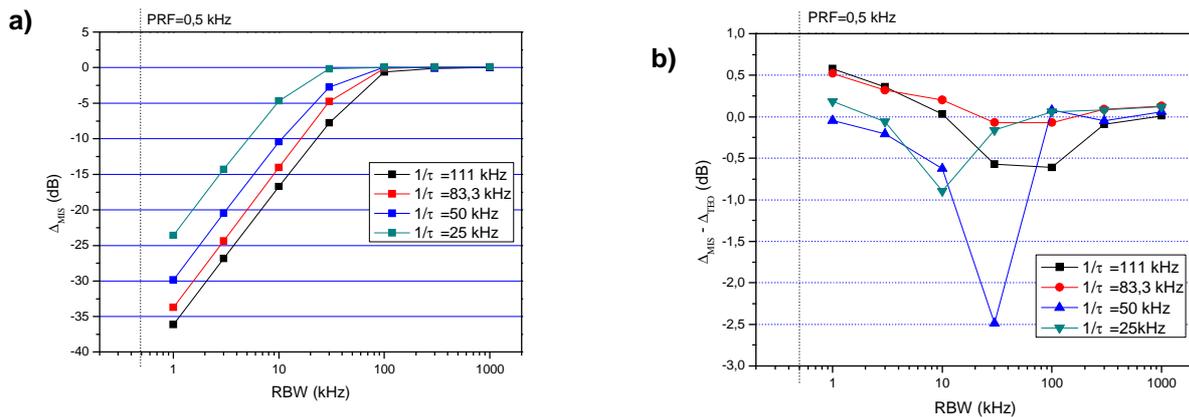


Figura 4 : Risultati ottenuti al variare della durata dell'impulso τ (T=2ms)



La figura 3b mostra la differenza tra il valore Δ_{MIS} ottenuto sperimentalmente in laboratorio (fig. 3a) ed il valore Δ_{TEO} previsto, pari al fattore di desensibilizzazione α_L per valori della RBW inferiori al PRF del segnale pulsato ed al fattore α_P per valori della RBW superiori al PRF ma inferiore ad $1/\tau$. La figura mostra come già per valori della RBW superiori a $1/\tau$, il valore misurato differisca da quello della portante non modulata entro pochi decimi di dB. Anche per valori della RBW $<$ PRF (ottenuti solo nel caso T=200 μ s), il valore Δ_{MIS} ottenuto è pari al fattore di desensibilizzazione α_L entro pochi decimi di dB. Per valori PRF $<$ RBW $<$ 0.2/ τ la differenza tra il valore Δ_{MIS} ottenuto ed il fattore α_P è contenuta entro 0.5 dB. Maggiormente critica sembra l'intervallo di valori di RBW per cui 0.2/ τ $<$ RBW $<$ 1/ τ in cui si ottengono scostamenti superiori a 0.5 dB nonché per quei valori della RBW per cui $0.2/\tau < RBW < 1/\tau$ in cui si ottengono scostamenti superiori a 0.5 dB nonch  per quei valori della RBW prossimi ai rispettivi valori del PRF in cui si passa dalla modalit  *line spectrum* a quella *pulse spectrum*. Successivamente le misure sono state ripetute mantenendo costante il periodo di ripetizione T pari a 2 ms e facendo variare la durata τ dell'impulso tra 9 μ s e 40 μ s. Le figg. 4a e 4b riportano i grafici analoghi a quelli riportati in precedenza nelle figg. 3a e 3b. Le curve ottenute in fig. 4a sono simili a quelle ottenute in fig. 3a con pendenze di 10 dB/decade per valori PRF $<$ RBW $<$ 0.2/ τ . Anche la fig. 4b conferma i risultati ottenuti in precedenza mostrando nuovamente scostamenti non superiori a 0.5 dB per tutto l'intervallo dei valori della RBW sia in modalit  *line spectrum* che *pulse spectrum* ad eccezione dell'intervallo 0.2/ τ $<$ RBW $<$ 1/ τ in cui, in questo caso, le differenze raggiungono valori di 2.45 dB

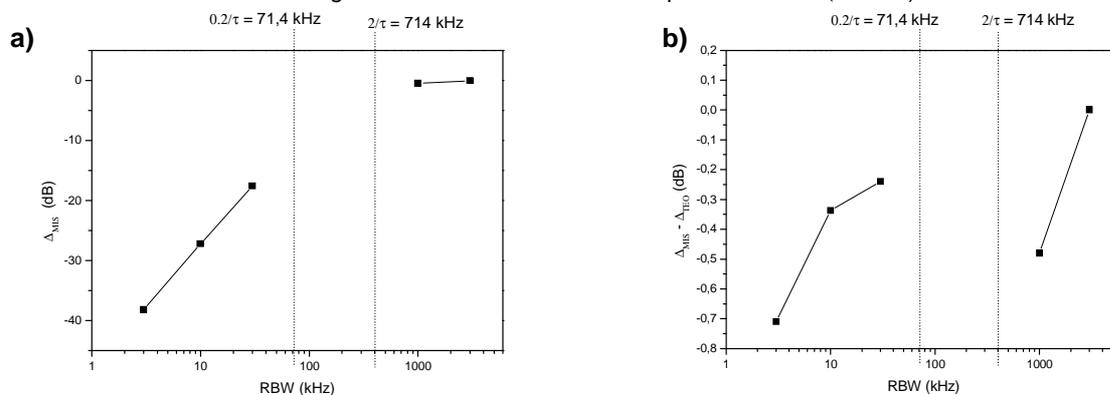
MISURE IN SITU: METODOLOGIA E RISULTATI

Le misure sono state ripetute in situ presso un radar di potenza per il controllo del traffico aereo. Il radar trasmette in banda L alla frequenza di circa 1.3 GHz. L'impulso di modulazione presenta una durata $\tau=2.8 \mu$ s ed un periodo T =2.2 ms. Tali valori determinano una valore del PRF pari a circa 450 Hz ed un valore $1/\tau$

pari a circa 357 kHz. Le misure sono state effettuate per mezzo di un'antenna log-spirale EMCO mod. 3102 (1-10 GHz), un cavo coassiale e l'analizzatore di spettro Agilent mod. E4402B utilizzato per le misure di laboratorio. Considerati i valori del PRF del radar, con l'analizzatore a disposizione non è possibile la misura in modalità *line spectrum* essendo la minima RBW disponibile pari a 1 kHz. Si è provveduto pertanto ad una verifica dei risultati che si ottengono dalla misura in modalità *pulse spectrum* sia per valori di RBW tali che $PRF < RBW < 0.2/\tau$ sia per quei valori tali che $RBW > 1/\tau$. Le misure sono state effettuate utilizzando un valore della VBW pari a $10 \cdot RBW$ (ad eccezione dei valori $RBW \geq 1$ MHz). Il tempo di SWEEP utilizzato è stato pari a 100 ms, la banda di frequenza visualizzata (SPAN) pari a 2 MHz ed il detector in modalità PEAK.

La fig. 5a mostra i risultati ottenuti per la quantità Δ_{MIS} (fig. 5a) e per la differenza tra Δ_{MIS} e Δ_{TEO} (fig. 5b) dove come valore di riferimento è stato considerato il valore misurato per $RBW = 3$ MHz. La fig. 5b mostra valori per le differenze compresi entro 0.7 dB. Occorre a tale proposito considerare che per il calcolo del fattore α_P sono stati utilizzati i valori di targa (per la larghezza del filtro RBW e per il coefficiente k) o forniti dal gestore del radar (per la durata dell'impulso τ). Le differenze riscontrate potrebbero pertanto ulteriormente ridursi determinando sperimentalmente tali valori per poi utilizzarli nel calcolo di α_P .

Figura 5 : Risultati ottenuti in situ presso il radar (T=2ms)



CONCLUSIONI

Le misure effettuate sia in laboratorio che in situ avevano lo scopo di applicare quanto previsto dalla norma CEI 211-7B alla misura dei segnali prodotti da un radar di potenza per il controllo del traffico aereo utilizzando un analizzatore di spettro nelle modalità *line spectrum* e *pulse spectrum* e di confrontare i risultati che si ottengono con quanto atteso. I risultati mostrano come le differenze siano comprese entro 0.5 dB in laboratorio e 0.7 dB sul campo non solo in modalità *line spectrum* ma anche nella modalità *pulse spectrum* ad eccezione dei valori della larghezza del filtro IF per cui vale la relazione $0.2/\tau < RBW < 1/\tau$ e dei valori per cui $RBW = PRF$. Viene confermato, come previsto dalla norma CEI, che le condizioni di misura che garantiscono la migliore accuratezza sono in modalità *line spectrum* ed in modalità *pulse spectrum* per valori del filtro RBW tali da contenere il lobo principale dello spettro ($RBW > 2/\tau$). Rispetto alla norma CEI, i risultati mostrano tuttavia come già per valori della RBW superiori a $1/\tau$, si ottenga direttamente il valore di picco del segnale. Inoltre, gli scostamenti ottenuti nella modalità *pulse spectrum* per valori del filtro RBW tali che $PRF < RBW < 0.2/\tau$ mostrano come sia possibile effettuare la misura anche sotto tali condizioni senza che la misura sia affetta da valori elevati dell'incertezza. Ciò riveste particolare importanza nei casi in cui i parametri della modulazione del radar (durata τ dell'impulso e periodo T) e i filtri RBW disponibili sull'analizzatore non consentono di effettuare la misura nelle condizioni che garantiscono la migliore accuratezza. Risultati ancora migliori potrebbero essere ottenuti potendo utilizzare, per il calcolo dei fattori di desensibilizzazione, valori misurati per i parametri in gioco anziché quelli di targa o, come nel caso dei parametri del radar, forniti dal gestore.

Bibliografia

- [1] CEI, Norma tecnica 211-7 : Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10 kHz-300 GHz con riferimento all'esposizione umana, 2001.
- [2] Andreuccetti D., Campi elettromagnetici pulsati: problemi di misura e di valutazione dell'esposizione, Atti 1° convegno nazionale ARPAP-ISE su "Problemi e tecniche di misura degli agenti fisici in campo ambientale", pp.13-18, Ivrea, 2001.
- [3] CEI, Norma tecnica 211-7/B: Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10 kHz-300 GHz con riferimento all'esposizione umana, Appendice B: Misura e valutazione del campo elettromagnetico emesso dagli impianti radar, 2008.
- [4] Agilent, Application Note 150-2: Spectrum Analysis...Pulsed RF, 2005, Agilent Tech.
- [5] Rohde&Schwarz, Application Note 1MA127: Overview of Tests on Radar Systems and Components, 2008
- [6] Schaefer W., Understanding Impulse Bandwidth Specifications of EMI Receivers, Conformity, 2005