



CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

**ISTITUTO DI FISICA APPLICATA
"NELLO CARRARA"
FIRENZE - ITALY**

**CARATTERIZZAZIONE DELLE EMISSIONI
ELETTROMAGNETICHE DELLE SORGENTI RADAR,
CONFRONTO CON I LIMITI DI ESPOSIZIONE PER
LA POPOLAZIONE, INDIVIDUAZIONE DELLE
METODICHE DI MISURA E DELLE SPECIFICHE
TECNICHE DEGLI APPARATI DI MISURA**

**REPORT FINALE DI RICERCA RELATIVO AL PROGETTO IFAC-ISPRA
*Convenzione per una attività di studio in materia di campi
elettromagnetici, inerente la caratterizzazione delle
emissioni elettromagnetiche delle sorgenti radar***

M.Bini
A.Ignesti
C.Riminesi

Modulo INT.P01.006.001

Aprile 2010



Questa relazione riferisce sull'attività svolta nel progetto: *Sorgenti radar: caratteristiche delle emissioni elettromagnetiche, confronto con i limiti di esposizione per la popolazione, metodiche di misura e specifiche tecniche degli apparati di misura*, nell'ambito della collaborazione fra IFAC-CNR e ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale).

Il progetto ha affrontato i seguenti punti:

1. Indagine sulla normativa, in vigore in Italia o comunque usata da chi si interessa di questi problemi nell'ambito della protezione dai campi elettromagnetici (CEM), con particolare riferimento ai CEM emessi da impianti radar;
2. Messa a punto di una procedura che, utilizzando strumentazione facilmente reperibile sul mercato, permetta di misurare le quantità significative per la protezione delle persone dall'esposizione ai CEM emessi da impianti radar;
3. Verifica della validità della procedura di cui al precedente punto 2, mediante campagne di misura su alcuni impianti radar di interesse per la sorveglianza fisica ambientale presenti sul territorio.

Il progetto non ha analizzato in dettaglio tutti i tipi di radar che la tecnologia rende disponibili, ma si è concentrato su quelle installazioni di rilevante impatto sul territorio, che producono segnali di intensità tale da risultare di interesse per che si occupa di protezione dell'ambiente. In sostanza, sono stati considerati i radar primari per il controllo del traffico aereo (ATCR, di rotta e di avvicinamento all'aeroporto) e i radar meteorologici. Le bande di frequenza interessate sono, pertanto, le seguenti:

Banda L	1 – 2 GHz	ATCR di rotta, controllo del traffico aereo a lungo raggio;
Banda S	2 – 4 GHz	ATCR per il controllo dell'avvicinamento agli aeroporti;
Banda C	4 – 8 GHz	Radar meteorologici.

1. Quadro normativo

L'esposizione della popolazione¹ ai CEM è regolata in Italia dalla legge n. 36, del 22 febbraio 2001[1] che indica i principi fondamentali e dal DPCM dell'8 luglio 2003[2], che stabilisce i limiti di esposizione in termini di intensità del campo elettrico (in V/m) o di densità di potenza (W/m^2), al variare della frequenza.

Purtroppo, per quel che concerne gli impianti radar, il suddetto DPCM 08/07/2003 (Art.1, comma 3) afferma che i limiti verranno stabiliti da un successivo DPCM, che però a tutt'ora non ha visto la luce. Per fortuna lo stesso DPCM (Art.1, comma 4) fornisce una soluzione temporanea stabilendo che "per i CEM generati da sorgenti non riconducibili ai sistemi fissi delle telecomunicazioni e radiotelevisivi, si applica l'insieme completo delle raccomandazioni stabilite nella raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea del 12 luglio 1999[3]. Quest'ultima, accogliendo le indicazioni contenute nelle linee guida dell'ICNIRP[4], chiede di limitare la densità di potenza di picco dei CEM pulsati (e quindi anche dei CEM emessi dagli impianti radar) ad un valore ottenuto moltiplicando per 1000 la densità di potenza media (media su 6 minuti), o, equivalentemente, di usare come limite per il campo elettrico di picco il valore che si ottiene moltiplicando per 32 il limite per il campo elettrico medio. In sostanza, i limiti per il picco dei campi pulsati sono definiti 30 dB sopra quelli prescritti per i valori medi.

¹ Per quanto concerne i lavoratori, la normativa di riferimento è il D.Lgs 81/2008 (conforme alla direttiva CE 2004/40, che a sua volta è conforme alle già citate Linee Guida ICNIRP per la parte relativa ai lavoratori) che afferma: "Per le frequenze comprese tra 10 MHz e 300 GHz, i valori di azione di picco sono calcolati moltiplicando i valori efficaci (rms) corrispondenti per 32 nel caso delle intensità di campo e per 1000 nel caso della densità di potenza di onda piana equivalente"

Riassumendo, in attesa di un decreto specifico, per i limiti dei campi emessi dai radar si hanno queste alternative.

- (1) Un approccio più cautelativo, con il quale per il campo elettrico si assume, il valor medio di 6 V/m (previsto dal DPCM 08/07/2003) e il valore di picco di $32 \times 6 \text{ V} = 192 \text{ V/m}^2$;
- (2) Un'adesione puntuale al DPCM 08/07/2003, il quale rimanda alla raccomandazione dell'UE del 12/07/1999 e quindi prescrive per il campo medio il limite di $1.375 \times f^{d/2} \text{ V/m}$, per f compresa fra 400 MHz e 2000MHz e 61 V/m per f da 2GHz a 300GHz; questi valori vanno moltiplicati per 32 per i valori di picco.

2. Procedura di misura

Per valutare il rispetto della normativa, scelta con i criteri indicati nella precedente sez. 1, è necessario misurare il *valor medio* e il *valore di picco* del campo, che vanno quindi confrontati con i valori della norma prescelta. Inoltre, è necessario misurare la *frequenza* del radar, perché dipendono dalla frequenza alcuni parametri della strumentazione utilizzata (AFC dell'antenna e attenuazione del cavo) e possono dipendere dalla frequenza i limiti di esposizione.

La procedura di misura da noi individuata prescinde da qualsiasi conoscenza a priori sulle caratteristiche del radar oggetto della misura. In altre parole non è necessario chiedere all'autorità che gestisce l'impianto informazioni su: frequenza di lavoro; caratteristiche dell'antenna (angolo del fascio); caratteristiche del segnale emesso (durata degli impulsi, frequenza di ripetizione).

La strumentazione utilizzata per le misure è, in estrema sintesi, costituita dai seguenti componenti. Per una descrizione più approfondita si rimanda al documento specifico[5].

- 1. Antenna calibrata.** L'antenna deve essere adatta per le bande di frequenza in cui operano i radar, o almeno quelli di maggior potenza per i quali sono richieste campagne di misura. Scelte convenienti sono la Spirale logaritmica (banda tipica: 1 ÷ 10 GHz) e la Tromba Double ridged (750 MHz ÷ 18GHz). L'antenna deve essere provvista di ACF (Antenna Calibration Factor) per poter calcolare il campo elettrico E dal valore della tensione V_a presente ai capi dell'antenna: $E = ACF \cdot V_a$.
- 2. Cavo di collegamento RF.** Ha il compito di portare il segnale dall'antenna al ricevitore. Ne deve essere nota l'attenuazione (AttCAVO) alla frequenza di operazione del radar in modo da poter ricavare la tensione ai capi dell'antenna da quella V_r misurata dal ricevitore $V_a = \text{AttCAVO} \cdot V_r$.
- 3. Ricevitore.** Anche se è possibile e talvolta conveniente utilizzare apparecchiature meno sofisticate, quali un **diodo rivelatore ed un oscilloscopio**³, lo strumento più adatto e tipicamente maggiormente utilizzato è lo **Spettro Analizzatore (SA)**.

Lo SA, fornendo una rappresentazione in funzione della frequenza di tutti i segnali che incidono sull'antenna, permette di individuare la presenza di impianti radar e di effettuare misure su tutti i parametri di interesse del segnale: frequenza della portante; potenza di picco; durata degli impulsi, frequenza di ripetizione degli impulsi, larghezza del fascio dell'antenna, tempo di rotazione dell'antenna.

Lo SA deve coprire la gamma di frequenza in cui si pensa operi il radar. Uno SA che arrivi fino a 7GHz è sufficiente, mentre gli spettro analizzatori per le telecomunicazioni, specie quelli più economici che si fermano normalmente a 3 GHz, sono purtroppo insufficienti.

Altro caratteristica di interesse è la *Resolution Bandwidth (RBW)*, parametro che indica la larghezza del filtro di media frequenza e che deve essere sufficientemente elevato per una corretta ricezione degli impulsi di cui è costituito il segnale radar. Un criterio per la scelta è che RBW sia quattro volte o più dell'inverso della durata dell'impulso τ^4 , ovvero $RBW \geq 4/\tau$.

² In realtà, il DPCM 08/07/2003 distingue fra: *Limiti di esposizione* (20 V/m, per f compresa fra 3MHz e 3GHz; 40 V/m, per f fra 3GHz e 300GHz); *Valori di attenzione e Obiettivi di qualità*, per i quali non si deve superare 6 V/m. Però, oramai è consuetudine assumere i valori di attenzione come il limite per l'esposizione delle persone.

³ L'uso del diodo rivelatore è spiegato con un po' di dettaglio nella relazione sul Radar ATCR-33S dell'Aeroporto di Peretola [7] alla quale si rimanda.

⁴ Dallo sviluppo di Fourier di un impulso rettangolare si ottiene facilmente che in una banda larga $2/\tau$, centrata sulla portante (che comprende la campata principale dello spettro), è contenuto circa il 90% della potenza

Inoltre lo SA deve poter operare in modalità *zero span* e in modalità *channel power*.

Una volta misurata l'intensità del segnale V_r all'ingresso del ricevitore, si può ricavare l'intensità alla bocca dell'antenna e da questa si calcola il campo elettrico E .

Se, come è tipico, lo SA fornisce l'intensità del segnale in dBm, allora la formula seguente permette di passare dalla tensione V_r in dBm⁵ al campo elettrico E in dBV/m (V/m espressi in dB):

$$E(\text{dBV/m}) = V_r(\text{dBm}) - 13 + \text{ACF}(\text{dB}) + \text{AttCAVO}(\text{dB}) \quad (1)$$

Quindi da $E(\text{dBV/m})$ si ricava E in V/m con la ben nota relazione:

$$E(\text{V/m}) = 10^{\frac{E(\text{dBV/m})}{20}} \quad (2)$$

La procedura di misura si compone dei seguenti passi. Per una descrizione dettagliata si rimanda al documento specifico [5].

2.1 Individuazione e misura della frequenza (o delle frequenze⁶) di lavoro

Si utilizza lo SA. Inizialmente si imposta la RBW più elevata disponibile e uno SPAN elevato (es. 1 - 7GHz) in modo da essere sicuri che il radar sia compreso nella banda esplorata. La presenza di alcuni rapidi guizzi indica la frequenza del radar. Si imposta la frequenza centrale sul valore a cui si sono notati i guizzi e si riducono SPAN (ad es. ad 1 MHz) e RBW (es. 100kHz). La scelta dello SPAN, del tempo di sweep, di RBW richiedono alcune considerazioni che sono riportate in [5].

2.2 Misura della potenza di picco⁷

Per la potenza di picco, la procedura prevede due modalità di misura: nel dominio della frequenza e nel dominio del tempo. Una volta acquisito il valore V_{rpk} di picco del segnale sul ricevitore, questo può essere inserito nella (1) e quindi nella (2), ottenendo il valore di picco E_{pk} (in V/m) del campo elettrico da confrontare con quanto previsto dalla normativa prescelta.

2.2.1 Misura nel dominio della frequenza

Si scelgono queste impostazioni per lo SA: frequenza centrale, quella operativa del radar, già determinata; RBW, la massima disponibile (es. 10 MHz); SPAN, due volte la RBW; sweep su SINGLE con un tempo di spazzolata (SWT) sufficientemente lungo da far sì che la permanenza in ciascun punto dello schermo sia uguale alla durata di una rotazione dell'antenna⁸; rivelatore di Picco.

dell'impulso e in una banda larga $4/\tau$ il 95%. Cioè, filtrando lo spettro con un filtro largo $4/\tau$ si commette un errore di -0.05 (-0.22dB).

⁵ Indicare con il simbolo V_r una quantità espressa in dBm (riferita quindi ad una potenza) può apparire ambiguo e fuorviante. In realtà, ci è sembrato il miglior compromesso fra due modi per interpretare il dato acquisito dallo SA: (1) è una misura della tensione presente sul connettore di ingresso; (2) è un dato rappresentato su una scala comunemente tarata in dBm. L'ambiguità si risolve però facilmente se, ricordando che l'impedenza di ingresso dello SA è solitamente di 50Ω , si vede subito che alla tensione V_r (espressa in volt efficaci) corrisponde, in maniera univoca, la potenza (in milliwatt) di $(1000/50) \cdot V_r^2$.

⁶ Molti radar per il controllo del traffico aereo, per varie ragioni tecniche su cui non ci soffermiamo, operano su più frequenze. Ad es. il radar di Maccarese (Fiumicino) usa due frequenze intorno a 1.3GHz, e quello di Peretola impiega tre frequenze intorno a 2.8 GHz

⁷ Si ricorda che il segnale radar è costituito da un segnale sinusoidale a microonde (portante) modulato ad impulsi. Con il termine *potenza di picco* si indica la potenza media, mediata sulla durata dell'impulso ed il campo di picco E_{pk} è il valore efficace (si scusi il bisticcio di parole) della sinusoide che rappresenta il campo elettrico durante l'impulso.

⁸ Se T_{Rot} indica il tempo di rotazione dell'antenna e N_p indica il numero di punti dello schermo, si deve impostare $SWT = T_{Rot} \cdot N_p$, in modo che in ogni punto dello schermo venga acquisita un'intera sequenza di impulsi corrispondente al tempo di illuminazione T_i nel punto di misura. La misura di T_{Rot} e di T_i è descritta più avanti (2.3.1).

Un'altra scelta è quella di operare con sweep continuo, impostato su tempi più rapidi ($SWT =$ alcuni ms.), traccia su Max Hold e lasciare andare avanti la misura fino a quando non si vede sullo schermo uno spettro ben formato. Questa procedura ha il vantaggio di apparire più veloce, ma costringe a presenziare alla misura per giudicare

Una volta terminata la spazzolata si posiziona un marker sul massimo dello spettro e si misura V_{rpk} .

2.2.2 Misura nel dominio del tempo

Si utilizza lo SA in modalità ZERO SPAN. Si visualizzano le sequenze di impulsi sullo schermo e si misura il più elevato degli impulsi⁹. Per fare questo, si utilizza il TRIGGER VIDEO, alzandone il livello in modo da far partire la traccia con l'impulso più elevato e usando il trigger off-set per far apparire questo verso il centro dello schermo. L'uso del marker permette quindi di rilevare V_{rpk} .

La procedura nel dominio del tempo, ora descritta, è più complessa ed in genere maggiormente prona ad errori che non quella nel dominio della frequenza descritta nel precedente paragrafo (2.2.1), che è pertanto da preferire.

2.3 Misura della potenza media

La potenza media può essere ottenuta con una misura nel dominio della frequenza oppure può essere calcolata dalla potenza di picco. E' bene eseguire la misura con l'una e l'altra delle procedure. I valori ottenuti possono essere confrontati fra loro e fornire un'indicazione della incertezza della misura.

Una volta ottenuta la potenza media del segnale V_{rm} (in dBm) all'ingresso dello SA, si calcola con la (1) e la (2) il campo elettrico medio E_m che incide sull'antenna e che va confrontato con i valori indicati dalla normativa prescelta.

2.3.1 Misura nel dominio del tempo

Il segnale radar è costituito da sequenze di impulsi di durata τ che si ripetono con periodo T_R . Le sequenze di impulsi arrivano nel punto di misura in corrispondenza al passaggio del fascio dell'antenna sul punto di osservazione. I passaggi del fascio sono separati fra loro dal tempo di rotazione dell'antenna T_{Rot} . Poiché l'antenna è molto direttiva, il fascio ha un'apertura α molto stretta e quindi il tempo di esposizione al campo EM dura un tempo T_i , che è una piccola frazione del tempo di rotazione e può essere espresso dalla semplice formula (con α in gradi):

$$T_i = \frac{\alpha}{360} T_{Rot} \quad (3)$$

Le quantità suddette possono essere misurate con lo SA in modalità ZERO SPAN oppure con il set-up diodi rivelatore/oscilloscopio. La procedura di misura, che è dettagliata in [5], richiede di agganciare la partenza della traccia adattando il livello del trigger all'altezza dell'impulso e aggiustando il tempo di sweep a seconda delle diverse scale temporali, ovvero:

- Alcune decine di secondi, per il tempo di rotazione T_{Rot} ;
- Alcune decine di millisecondi, per il tempo di illuminazione T_i ;
- Alcuni millisecondi per il tempo di ripetizione T_R ;
- Alcuni microsecondi, per la durata dell'impulso τ .

Nota la potenza di picco dell'impulso V_{rpk} (vedi sez. 2.2), l'intensità media del segnale V_{rm} , in dBm, si calcola con la formula seguente di facile derivazione:

$$V_{rm} \text{ (dBm)} = V_{rpk} \text{ (dBm)} + 10 \log \left(\frac{\tau}{T_R} \right) + 10 \log \left(\frac{T_i}{T_{Rot}} \right) \quad (4)$$

nella quale la somma del primo e del secondo termine (che è il logaritmo del duty cycle τ/T_R) dà luogo alla potenza media ad "antenna ferma", mentre l'aggiunta del secondo termine tiene conto della riduzione della potenza media causata dalla rotazione dell'antenna.

2.3.2 Misura nel dominio della frequenza (CHPW)

quando il massimo dello spettro non cambia più. Noi suggeriamo di usare la procedura apparentemente più lunga, ma che non richiede all'operatore esperienza e capacità di decidere.

⁹ Gli impulsi ricevuti nel punto di misura non appaiono tutti uguali: hanno altezza massima quando l'antenna del radar punta verso il punto di misura e decrescono con un andamento che ricalca il diagramma di radiazione dell'antenna a causa della sua rotazione.

In modalità *channel power* (CHPW) lo SA calcola la potenza del segnale compreso in una banda di frequenza che definiamo impostando il parametro CHBW. Diamo qui le impostazioni da effettuare sullo SA e i passi della misura, rimandando al documento[5] per precauzioni e dettagli.

- Predisporre il Detector in modalità RMS;
- Impostare la RBW su 30 kHz e la VBW su 100 kHz;
- Mettere lo SA in modalità CHPW
- Impostare la CHBW su un valore da 4 a 8 volte $2/\tau$, dove τ indica la durata dell'impulso¹⁰ (misurata nella sez. 2.3.1) e impostare lo SPAN su un valore appena superiore a CHBW;
- Scegliere il valore di SWT con il criterio presentato al precedente punto 2.2.1 e nella nota ⁸.
- Impostare lo Sweep su SINGLE; e il Trigger su FREE RUN;
- Al termine della spazzolata lo SA presenta, con l'etichetta "CHPW" il valore della potenza misurata, che costituisce il valore dell'intensità media del segnale

3. Campagne di misura

La procedura di misura di cui si è brevemente riferito è stata utilizzata in alcune campagne di misura su radar tipici presenti sul territorio con lo scopo di valutare in casi reali la capacità della procedura di determinare l'intensità (di picco e media) dei campi EM al fine di decidere se i valori misurati rispettano le norme di esposizione.

3.1 Radar meteorologico di Gattatico (RE)

Il radar è localizzato alle coordinate 44.790949N, 10.498438E¹¹. Usando la procedura messa a punto, si sono ottenuti i seguenti risultati per i parametri tipici del radar:

Tabella 1 - Caratteristiche del radar di Gattatico risultanti dalle misure

Frequenza di lavoro f	5.45 GHz;
Durata dell'impulso τ	0.48 μ s;
Periodo di ripetizione T_R (frequenza di ripetizione f_R)	0.84 ms; 1190 Hz);
Larghezza del fascio a -3dB	1 deg
Periodo di rotazione T_{Rot}	23.2 sec;

Da una verifica presso ARPA Emilia Romagna (Arpa-emr) che gestisce l'impianto è risultato che questi valori sono pressoché coincidenti con quelli nominali forniti dal costruttore del radar. Come si vede il segnale ha forma classica, tipica dei radar meteorologici: portante in banda C, un solo impulso molto corto per ciclo e un piccolo ciclo di servizio ($\tau/T_R = 0.57 \times 10^{-3}$).

Le misure sono state effettuate in due siti scelti da Arpa-emr: Punto 1 (coordinate, 44.790318N, 10.498182E), distanza 72.5m; Punto 2 (44.78250 10.508627), distanza 1236 m. Dal valore della potenza di picco V_{pk} misurata alla porta dello SA, utilizzando le formule (3) e (4) si ottiene V_m e quindi si calcola con le (1) e (2) il campo E di picco e medio mostrati nella tabella seguente (Tabella 2)¹².

Si noti che il rapporto E_{picco}/E_{medio} vale 176.4 nel Punto di misura 1 e 805.6 nel Punto 2. La differenza fra questi due valori è dovuta al fatto che nel Punto 1, che è nel campo vicino (a poche decine di metri e sotto il pilone dell'antenna), il fascio dell'antenna è molto più ampio (circa 20 gradi) e conseguenza la potenza viene più diluita rispetto al punto nel campo lontano, dove essa è concentrata in un angolo di 1 grado.

¹⁰ In alcuni radar, vengono emessi in ogni ciclo più impulsi di durata diversa (Ad es., nel radar di Peretola, una coppia di impulsi di 10 μ s e 100 μ s). In questo caso il τ da introdurre nella relazione è quello dell'impulso più corto.

¹¹ Qui e nel seguito si utilizzeranno le coordinate geografiche nel sistema WGS84, espresse in gradi sessadecimali.

¹² La Tabella 2 è tratta dalla relazione [6]. Per ritrovare i numeri qui riportati servono i valori dell'attenuazione del cavo, l'ACF dell'antenna (pari, rispettivamente, a 13dB e 44.7dB alla frequenza di lavoro del radar) e i valori della potenza di picco, per i quali le misure hanno dato -15.63dBm (punto 1) e -21.09dBm (punto 2)

Tabella 2 - Valori del campo elettrico (medio e di picco) misurati nei punti 1 e 2.

Campo elettrico	Punto 1 (Museo Cervi)	Punto 2 (Caprara)
E_{picco} (V/m)	28.4	15.1
E_{medio} (mV/m) "antenna ferma"	680	358
E_{medio} (mV/m) "antenna rotante"	161	18.8

3.2 Radar di rotta (Maccarese-Fiumicino, Roma)

Il radar è localizzato alle coordinate: 41.884029 N, 12.262280 E. Le misure sono state effettuate in un sito (coordinate 41.87706N, 12.25590E) distante 938.5m, con una procedura analoga a quella usata per il radar meteorologico di Gattatico. La differenza principale, oltre ovviamente alla banda di lavoro (banda L, invece che banda C) è che il radar opera su due distinte frequenze. I dati ottenuti con le misure sono riportati qui di seguito nella Tabella 3.

Tabella 3 - Caratteristiche del radar di Maccarese risultanti dalle misure

Frequenze di lavoro	$f_1 = 1.27$ GHz	$f_2 = 1.33$ GHz
Durata dell'impulso ¹³	$\tau_1 = 1.44$ μ s	$\tau_2 = 1.65$ μ s
Periodo di ripetizione T_R	2.16 ms;	
frequenza di ripetizione f_R	463 Hz;	
Larghezza del fascio a -3dB	1.1 deg	
Periodo di rotazione T_{Rot}	10.59 sec;	

Questi valori sono in buon accordo con le caratteristiche di un radar di rotta tipo 44K (Selex-SI)[10], che secondo la mappa della rete ENAV è il radar primario di Maccarese[9]. La potenza di picco misurata è risultata un po' diversa alle due frequenze operative del radar: 5.09dBm alla frequenza f_1 e 2.97dBm ad f_2 . Note l'attenuazione del cavo (2.19dB) e l'ACF dell'antenna di misura (25.3dB), si sono calcolati, con le (1) e (2), i valori di picco del campo, ottenendo: 9.53 V/m alla frequenza f_1 e 7.46V/m alla frequenza f_2 . Da questi e i dati della Tabella 3, inseriti nelle formule (3) e (4) si ottengono i valori medi.. I risultati di interesse protezionistico sono sintetizzati nella Tabella 4¹⁴.

Tabella 4 - Campo elettrico (medio e di picco) prodotti dal radar di Maccarese nel punto di misura.

Campo elettrico	
E_{picco} (V/m)	9.53
E_{medio} (mV/m) "antenna ferma"	321
E_{medio} (mV/m) "antenna rotante"	17.74

Il rapporto $E_{\text{picco}}/E_{\text{medio}}$ vale 537.2.

3.3 Radar dell'Aeroporto di Peretola (Firenze)

Il radar è installato nell'area dell'Aeroporto di Peretola, alla periferia di Firenze (coordinate 43.807274N, 11.193708E). Il segnale emesso dal radar è abbastanza complesso e ha richiesto un notevole impegno per la sua caratterizzazione. Qui non possiamo che dare pochi accenni sui risultati. Per il dettaglio si rimanda al report [7].

L'identificazione della frequenza di lavoro, con il metodo ricordato nella sez. 2.1, ha mostrato che il radar opera in banda S e utilizza *tre frequenze diverse*, riportate nella Tabella 5 insieme ai valori degli altri parametri caratteristici del radar, quali risultano dalle misure. I dati si accordano con una radar primario tipo 33S, quale risulta dalla già citata mappa della rete ENAV[9]. Per la determinazione dell'attenuazione del cavo e l'ACF dell'antenna prendiamo quelli a 2.8GHz, che valgono rispettivamente 5.8dB e 39dB.

¹³ Probabilmente i due impulsi hanno uguale durata e la differenza (13%) fra τ_1 e τ_2 è dovuta a imprecisione della misura

¹⁴ Si noti che per il campo elettrico di picco si è, ovviamente, riportato il maggiore fra quelli misurati alle frequenze f_1 ed f_2 , mentre i valori medi si sono ottenuti sommando le potenze medie ottenuti alle due frequenze.

Poiché le frequenze sono fra loro troppo distanti per essere sintonizzate contemporaneamente, la visualizzazione degli impulsi nel dominio del tempo con lo SA a ZERO SPAN deve essere eseguita separatamente per ciascuna frequenza. Da queste misure si ottiene facilmente l'intervallo fra due passaggi successivi del fascio, da cui si deduce il periodo di rotazione dell'antenna T_{Rot} (3.8sec.). Quando però, diminuendo il tempo di sweep, si passa ad analizzare la struttura della sequenza degli impulsi, si vede che (le immagini sono visibili in [7]) su ciascuna delle tre portanti vengono emesse sequenze di 14 impulsi, 7 corti e 7 lunghi, separate da un intervallo di silenzio. Si possono misurare la durata degli impulsi (10 μ s, per l'impulso corto, e 100 μ s l'impulso lungo) e l'intervallo fra gli impulsi. Tutte queste quantità risultano uguali per ciascuna delle tre frequenze.

Questa strana serie di 14 impulsi (7 corti e 7 lunghi) fa sospettare che la ricezione del segnale con lo SA non permetta di collocare nella corretta relazione temporale gli impulsi che arrivano sulle tre portanti. Per risolvere il dubbio abbiamo utilizzato il set-up diodo rivelatore/oscilloscopio al posto dello spettro analizzatore. In questa maniera gli impulsi possono essere ricevuti e visualizzati nella giusta sequenza temporale a prescindere dalla frequenza della portante. Il risultato è chiarissimo. Il segnale è costituito da una coppia di due impulsi (uno corto e uno lungo) che si ripete con periodo $T_R = 1.1$ ms. Questi viaggiano su ciascuna portante in sequenze di 14 (7 corti e 7 lunghi), fra loro correlati in modo che, una volta rivelati le sequenze che arrivano su frequenze diversi si intercalano fra di loro in modo da dar luogo a singole coppie corto-lungo. Dalle sequenze di impulsi rivelate con il diodo si ottengono gli stessi valori per la durata degli impulsi e per il tempo di rotazione ottenuto con lo SA. Inoltre, si possono valutare con maggiore facilità il tempo di ripetizione T_R degli impulsi e il periodo di illuminazione T_i . Tutti i dati che caratterizzano il radar di Peretola sono riassunti nella Tabella 5.

Tabella 5 - Caratteristiche del radar di Peretola (Firenze) ottenute con le misure

Quantità	Misurata
Frequenze di lavoro	$f_1 = 2.7348$ GHz $f_2 = 2.8152$ GHz $f_3 = 2.8552$ GHz
Durata impulsi	
Impulso corto τ_1	10 μ s
Impulso lungo τ_2	100 μ s
Tempo di ripetizione T_R (frequenza di ripetizione f_R)	1.1 ms (910 Hz)
Tempo di illuminazione T_i	14.8 ms
Periodo di rotazione T_{Rot} (velocità di rotazione)	3.8 sec. 15.8 rpm

Le misure sono state effettuate in alcuni punti in prossimità dell'Aeroporto. I dati che riportiamo qui sono quelli ottenuti dal punto di misura (di coordinate 43.817465N, 11.200886E) situato presso IFAC. La potenza di picco è stata misurata sia nel dominio della frequenza sia nel dominio del tempo con le modalità descritte nella sez. 2.2. Fra i due, il valore più accurato è quello nel dominio della frequenza, come si è mostrato in [7]. Il valore ottenuto è -15.83dBm. Utilizzando questo dato assieme all'attenuazione del cavo e l'ACF dell'antenna già ricordati, si ottiene per il campo di picco $E_{picco} = 6.29$ V/m.

Anche la potenza media è stata valutata in due modi: con il calcolo, utilizzando il valore di picco e i dati della Tabella 5; con misure effettuate nel dominio della frequenza con lo SA in modalità Channel Power. La valutazione con il calcolo utilizza la formula (4), nella quale si introduce per τ la somma $\tau_1 + \tau_2 = 110\mu$ s, ovvero la durata della coppia di impulsi. Il risultato è -50.76dBm. L'altra modalità è quella di misurare direttamente la potenza media con il metodo del Channel Power (sez. 2.3.2); l'operazione va ripetuta su ognuna delle tre frequenze e vanno quindi sommati i singoli contributi. Il risultato, in questo caso, è di -49.5dBm. La misura in modalità CHPWR è da ritenere più accurata

(vedi [7]). Introducendo -49.5dBm nella (1) si ottiene il valore di E_{medio} ad antenna rotante mostrato in Tabella 6. In questa tabella si è riportato, per completezza, anche il campo medio ad antenna ferma¹⁵.

Tabella 6 - Valori del campo elettrico (medio e di picco) rilevati nel sito di misura presso IFAC-CNR.

Campo elettrico	Valori misurati
E_{picco}	6.3 V/m
E_{medio} "antenna ferma"	1.8 V/m
E_{medio} "antenna rotante"	0.130 V/m

Il rapporto $E_{\text{picco}}/E_{\text{medio}}$ vale 48.5 (33.7dB).

4. Conclusioni

E' stata passata in rassegna la normativa italiana per la protezione della popolazione dall'esposizione ai campi elettromagnetici e si è visto che si è ancora in attesa di un decreto che dia indicazioni specifiche per l'esposizione ai campi prodotti dagli impianti radar. Si è però notato che il DPCM 08/07/2003 [2] suggerisce una soluzione derivata dalla raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea del 12/07/1999[3].

Si è quindi messa a punto una procedura per la misura dei segnali radar che permette di acquisire tutte le quantità (frequenza della portante, valore di picco e valor medio del campo elettrico) che servono per valutare se in un prefissato sito sono rispettati i limiti di sicurezza per la popolazione. La procedura utilizza strumentazione di facile reperibilità sul mercato.

La procedura individuata è stata utilizzata in alcune campagne di misura su radar tipici, scelti fra quelli di maggior impatto ambientale e cioè: un radar meteorologico; un radar per il controllo del traffico a larga raggio (radar di rotta) e un radar per il traffico aereo di medio raggio (radar per l'avvicinamento all'aeroporto). In tutti questi casi la procedura ha permesso di misurare con sicurezza le quantità richieste per giudicare la conformità del sito alla normativa.

Una osservazione interessante è che in tutti i casi presi in considerazione il rapporto fra campo di picco e campo medio è sempre risultato superiore a 32 (30dB), valore che la normativa indica come la quantità per cui moltiplicare il limite del valor medio per ottenere quello per il valore di picco. Questo anche nel caso di un radar moderno, come quello installato all'Aeroporto di Peretola (Firenze), caratterizzato da un duty cycle (1/10) il più elevato che ci sia capitato di vedere. L'interesse di questa osservazione sta nel fatto che essa indica che il valore da tenere sotto controllo con maggior attenzione per verificare il rispetto dei limiti di sicurezza è quello di picco piuttosto che il valor medio.

¹⁵ Calcolata con la formula (4), senza l'ultimo addendo che tiene conto della rotazione dell'antenna. Per maggiori dettagli si veda [7].

5. Riferimenti

- [1] Legge 22 febbraio 2001, n. 36 "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni ai campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici", *GU n.55 del 7-3-2001*;
- [2] DPCM 8 Luglio 2003: "Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz", *GU n. 199 del 28-8-2003*;
- [3] Raccomandazione del 12 luglio 1999 relativa alla limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz (L 199/59), GU della Comunità Europea del 30/7/1999;
- [4] International Commission on Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz).", *Health Physics* 74: 494-522 (1998);
- [5] M.Bini, A.Ignesti, C.Riminesi: *Procedura per la misura di Campi EM emessi da Impianti Radar utilizzabile in campagne di Sorveglianza Fisica Ambientale*, Report CNR-IFAC-TR-08/009, Agosto 2009;
- [6] M.Bini, A.Ignesti, C.Riminesi: *Misure sul Radar Meteorologico di Gattatico (Reggio Emilia)*, Report CNR-IFAC-TR-06-1/009, Giugno 2009;
- [7] M.Bini, A.Ignesti, C.Riminesi: *Misura del campo EM emesso dal Radar Primario ATCR-33S installato presso l'Aeroporto di Firenze-Peretola*, Report CNR-IFAC-TR-01/010, Gennaio 2010;
- [8] M.Bini, A.Ignesti, C.Riminesi: *Misure sul Radar di Rotta di Maccarese Fiumicino (Roma)*, Report CNR-IFAC-TR-02-1/010, Febbraio 2010;
- [9] ENAV, documento: "Area Tecnica-Tecnologie/Sorveglianza" in <http://radarlab.disp.uniroma2.it/AICT/3-neri.pdf>;
- [10] S. Gelli: "Radar di avvistamento e sistemi di tracking", in <http://infocom.uniroma1.it/~robseu/Radar%20e%20navigazione%20aerea/Seminario%202/seminario%20AMS%202.pdf>.