

Misure sul Radar Meteorologico di Gattatico (Reggio Emilia)*

M. Bini⁽¹⁾, A. Ignesti⁽¹⁾, C. Riminesi⁽¹⁾

⁽¹⁾ IFAC-CNR, Via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino (FI), Italy

* La relazione riferisce sui risultati ottenuti con la campagna di misura effettuata sul radar di Gattatico (Reggio Emilia), uno dei due radar meteorologici utilizzati da ARPA Emilia Romagna (l'altro è a S. Pietro Capo Fiume).

1 - Introduzione

La campagna di misura, di cui si riportano qui i risultati, fa parte del 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*" che IFAC-CNR svolge nell'ambito di una collaborazione e con il parziale supporto finanziario dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA).

Scopi del progetto sono: (a) l'analisi dello stato attuale della normativa italiana in merito alla esposizione della popolazione ai campi emessi dalle apparecchiature radar; (b) l'individuazione e la messa a punto di una procedura che permetta di misurare l'intensità dei segnali radar e di giudicare se in uno specificato punto vengono rispettate le norme di sicurezza. La procedura di misura deve poter essere applicata senza interrompere il normale funzionamento dell'impianto radar e utilizzando strumentazione facilmente reperibile sul mercato. L'analisi della normativa, di cui riportiamo una sintesi nel §5.1, indica che le quantità che è necessario determinare con la misura sono l'intensità del valore di picco del segnale e il suo valor medio (media effettuata su un intervallo di 6 minuti).

La presente relazione mostra come la procedura di misura è stata applicata con successo nel caso di un tipico radar meteorologico.

2 - Il radar di Gattatico

Il radar (Fig. 1) è installato in prossimità del "Museo Cervi", Via Fratelli Cervi 9 a Gattatico (Reggio Emilia), nel punto di coordinate (ricontrollate con Google) 44.790949, 10.498438, su una torre che porta il centro dell'antenna a 25 metri da terra. Il radar è gestito da remoto e, sempre da remoto, vengono raccolti i dati. Nei locali ai piedi della torre, non visibili nella figura perché coperti dagli alberi, sono alloggiati le apparecchiature e la consolle per il controllo locale del radar (Fig. 2). Nella Tab. 4 in Appendice, sono riportate alcune caratteristiche tecniche del radar, fornite gentilmente da ARPA Emilia Romagna. Anche se la procedura di misura utilizzata non necessita, come vedremo, di nessuna informazione preventiva, il confronto con questi dati dà al lettore la possibilità di valutare la correttezza dei risultati.

Nel suo uso più comune, il radar viene fatto operare secondo le due modalità che qui riassumiamo.

- Modalità standard. Il radar è attivo per circa due 2 minuti ogni 15 minuti. Nei due minuti di attività vengono effettuate 5 rotazioni complete (1 giro ogni 24 secondi, ovvero 15°/sec); ad ogni rotazione l'inclinazione viene cambiata di circa 0.6°, partendo da 0.5° e arrivando quindi all'inclinazione di 3.5°.
- Modalità con tempo perturbato. Il radar è attivo 10 minuti ogni 15. La velocità di rotazione è uguale a quella della modalità standard. Vengono spesi 2 minuti per un ciclo secondo la modalità standard. Negli altri 8 minuti vengono compiute ($8 \cdot 2.5 =$) 20 rotazioni, con l'elevazione che passa da 0.5° a 18°, in modo da esplorare una fascia di cielo maggiore.

In occasione della giornata riservata alle misure, nostre e di ARPA¹, non è stata usata nessuna delle due modalità (standard e con tempo perturbato) di cui abbiamo detto nel paragrafo precedente. Su richiesta nostra e di ARPA, per non allungare eccessivamente i tempi di misura, il radar è stato fatto ruotare con continuità alla velocità standard di 15°/sec e ad elevazione fissa di 0.5°.

¹ Oltre al nostro gruppo (LabSeCEm-IFAC), erano presenti ricercatori di ISPRA, con un loro furgone attrezzato, e operatori di ARPA Emilia Romagna sia per gestire il funzionamento del radar sia per effettuare una serie di misure richieste da una convenzione di ARPA con il comune di Gattatico.



Fig. 1 - Radar meteorologico di Gattatico (Reggio Emilia)



Fig. 2 – Consolle per il controllo locale del radar.

3 - Scelta delle grandezze da misurare e delle procedure di misura

Come è noto le quantità da misurare per la protezione ambientale sono sostanzialmente tre.

- La *frequenza di lavoro*, che deve essere nota sia perché i limiti esposizione dipendono, in generale, dalla frequenza, sia perché apparecchiature e componenti che intervengono nella catena di misura (antenna, cavo di collegamento fra antenna e ricevitore) richiedono l'uso di quantità, quali il fattore d'antenna e l'attenuazione del cavo, che dipendono significativamente dalla frequenza.
- La *densità di potenza media* S_m , in W/m^2 che incide nel punto di misura. Le medie, secondo lo standard vigente in Italia, vanno effettuate su intervalli di 6 minuti. Il valore del limite viene però tipicamente fornito con riferimento al valore efficace (espresso in V/m) del campo elettrico E di un'onda piana che

trasporti la specificata densità di potenza. Le due quantità vengono convertite l'uno nell'altra con la relazione $E^2 = \eta_0 S_m$, dove $\eta_0 = 377\Omega$ indica l'impedenza del vuoto.

- La *densità di potenza di picco*, che indica il valore massimo comunque raggiunto dalla densità di potenza.

La procedura da noi individuata è in grado di rilevare tutte le grandezze di interesse utilizzando un analizzatore di spettro moderno (nel nostro caso R&S ESPI7) e di un'antenna calibrata. La Fig. 3 mostra in forma schematica gli apparecchi utilizzati per la misura.

1. Antenna CLS (Conical Logarithmic Spiral) Ailtech mod. No. 93491-2 (1 – 10 GHz); Fattore d'antenna (AFC), a 5.45 GHz, $(41.7 + 3^2)$ dB = 44.7 dB.
2. Cavo coassiale tipo N, lunghezza 10 m; attenuazione, a 5.45 GHz, 13 dB
3. Analizzatore di Spettro R&S ESPI7, freq. range: 9kHz–7GHz; RBW: 10Hz–10MHz; possibilità di operare in modalità ZERO SPAN.

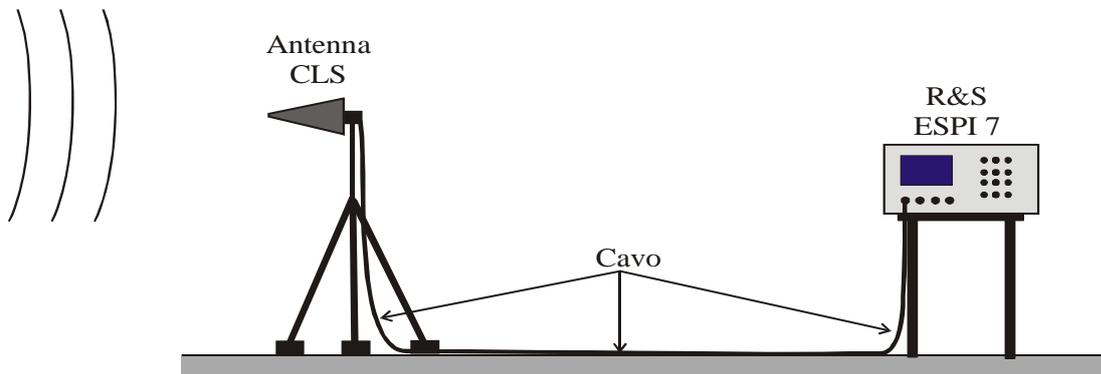


Fig. 3 -Rappresentazione schematica del setup di misura.

Ricordiamo che dall'intensità del segnale V_a (dBm), misurata con l'analizzatore di spettro ed espressa in dBm, si ricava il valore dell'intensità del campo elettrico E (dBV/m) che incide sull'antenna, espresso in dBV/m, con la seguente formula, di facile derivazione:

$$E(\text{dBV/m}) = V_a(\text{dBm}) - 13 + \text{AttCavo}(\text{dB}) + \text{AFC}(\text{dB}) \quad (1)$$

dove l'attenuazione del cavo e il fattore d'antenna sono, come indicato, espressi in dB.

Sostituendo i valori di attenuazione del cavo (13 dB) e AFC (44.7 dB), indicati più sopra ai punti 1 e 2, si ottiene la semplice relazione

$$E(\text{dBV/m}) = V_a(\text{dBm}) + 44.7 \quad (2)$$

4 - Definizione dei punti di misura ed effettuazione delle misure

Per l'effettuazione delle misure sono stati individuati due punti, uno nel campo vicino dell'antenna radar e l'altro nel campo lontano. Il primo, che indicheremo come punto 1 o punto Museo Cervi, è situato nelle immediate vicinanze dell'impianto radar. Il secondo è in prossimità dell'Hotel Valdenza, in Caprara, frazione del comune di Campegine.

² I 3 dB aggiuntivi sono dovuti al fatto che l'antenna CLS è costruita per polarizzazione circolare; nel caso in cui l'onda incidente abbia polarizzazione lineare, il guadagno dell'antenna diminuisce di 3dB e l'AFC aumenta di 3dB.

4.1 - Misure nel punto 1 (Museo Cervi)

Il punto di misura 1 (coordinate GPS: 44.790318, 10.498182) è molto vicino al radar. Con il telemetro misuriamo una distanza di 72.5 m (Google dice 72.6 m). Il punto è stato scelto per poter interagire direttamente con il personale di ARPA Emilia Romagna che ha una postazione proprio sotto la torre del radar per gestirne le funzioni da locale, come abbiamo detto nel §2.

4.1.1 - Individuazione della frequenza di lavoro

Sappiamo che i radar meteorologici della classe di quello in oggetto operano, tipicamente, intorno a 5 GHz (banda C). Con lo SA settato con span elevato ($4 \div 6$ GHz) e RBW (Resolution Bandwidth) di 10 MHz³, per non ridurre la sensibilità dello spettro analizzatore (a questo proposito si veda la precisazione più avanti, §4.2.1) vediamo il "guizzo" del radar intorno a 5.4 GHz.

A questo punto, impostiamo la traccia su MaxHold⁴ e riduciamo via via span e Resolution Bandwidth (RBW), fino ad arrivare ai valori, rispettivamente, di 20 MHz e 30 kHz. La Fig. 4 mostra una hard copy dello schermo dello spettro analizzatore con span = 20 MHz e RBW = 30 kHz. Una volta posizionato un marker sul massimo, centriamo la "campana" del segnale nel mezzo allo schermo e vediamo che la frequenza l'onda portante del radar vale $f_c = 5.45$ GHz.

4.1.2 - Misura dell'intensità dei picchi e della durata degli impulsi

La misura del valore del picco può essere effettuata sia nel dominio delle frequenze (uso tipico dello SA), sia nel dominio del tempo, sfruttando la modalità "zero span" dello SA come vedremo fra breve. In ambedue i casi, per evitare risultati scorretti, è necessario aumentare la RBW per le seguenti ragioni.



Fig. 4 - Spettro del segnale radar filtrato con una RBW di 30 kHz, idonea per la misura della frequenza di lavoro del radar.

³ 10 MHz è il valore massimo di RBW disponibile con lo SA R&S ESPI7.

⁴ Nella modalità MaxHold, lo SA, ad ogni spazzolata, aggiorna l'ordinata del punto presentato sullo schermo se e solo se il nuovo valore supera quello presentato nelle spazzolate precedenti. Il ricorso a questa modalità si rende necessario per catturare e "congelare" sullo schermo il valore del segnale ricevuto quando c'è coincidenza fra l'istante in cui l'antenna del radar punta verso la postazione di misura e, nello stesso tempo, la frequenza di sintonia dello SA coincide con quella emessa dal radar. Se invece si lascia la rappresentazione in modalità Clear/Write, che è quella di default, la traccia viene aggiornata ad ogni spazzolata e se (come è probabile con un radar che ruota lentamente e ha un fascio molto stretto quale è quello con cui si ha a che fare), quando lo SA è sintonizzato sulla frequenza del radar, il fascio di quest'ultimo non punta verso di noi, allora il segnale misurato risulterà molto basso e può cancellare il valore registrato in precedenza, quando, magari, si era verificato l'evento fortunato della coincidenza fra frequenza di sintonia e puntamento del fascio verso di noi.

- (a) Per quel che riguarda il dominio della frequenza, la RBW non deve essere troppo stretta rispetto alla banda di frequenze occupata dall'impulso, altrimenti i valori riportati dallo SA per l'ampiezza dello spettro risultano minori di quelli effettivi. Il fenomeno è detto, nel linguaggio tecnico, *desensitization* e la seguente formula, citata frequentemente in letteratura (si veda ad es. [1], pag. 18), permette di calcolare la riduzione d'ampiezza α_p quando RBW è inferiore all'inverso della durata τ dell'impulso:

$$\alpha_p = 20 \cdot \text{Log}(\tau \cdot K \cdot RBW) \quad (3)$$

K è un fattore che può assumere valori fra 1.2 e 1.7 a seconda della forma del filtro di media frequenza; la quantità α_p è espressa in dB. Ovviamente, se RBW è maggiore di $1/(K \cdot \tau)$, la (3) non si applica (infatti un valore di $\alpha_p > 1$ non ha senso). La formula suddetta, può essere espressa a parole dicendo che non si ha *desensitization*, ovvero che la misura dell'ampiezza dell'impulso è quella corretta, se il filtro di MF fa passare almeno metà del lobo principale dello spettro dell'impulso⁵.

- (b) Quando si opera nel dominio del tempo, la RBW deve essere sufficientemente larga da non deformare i fronti (di salita e di discesa) dell'impulso, il che richiede che RBW sia abbastanza più grande di $1/\tau$ (almeno un paio di volte). Si vede che questa condizione è più restrittiva di quella espressa al precedente punto (a).

A parte la scelta della RBW , per la misura con una o l'altra di queste tecniche (dominio della frequenza o dominio del tempo) è comunque necessario utilizzare la modalità MaxHold, per quanto evidenziato nella nota 4.

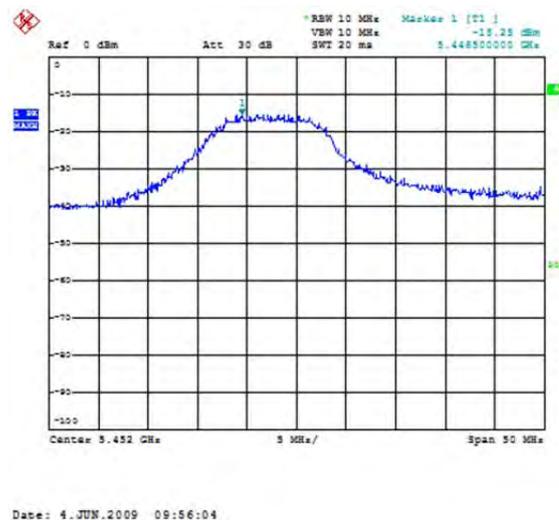


Fig. 5 - Spettro del segnale ottenuto con RBW di 10 MHz.

Per le ragioni su cui ci siamo testé dilungati, abbiamo dunque portato la RBW alla massima disponibile (10 MHz) e, rispetto alla Fig. 4, abbiamo aumentato anche lo span, portandolo a 50 MHz. Il risultato della misura è mostrato in Fig. 5. Il valore di picco risulta di -15.25 dBm ⁶ al quale corrisponde un valore del campo elettrico di 29.7 V/m, come si vede introducendo -15.25 dBm nella (2).

Come detto, la misura del valore di picco può essere effettuata anche nel dominio del tempo. A questo scopo usiamo lo SA a "ZERO SPAN", sintonizzato sulla frequenza di operazione del radar (che,

⁵ Si ricorda che l'involuppo dello spettro di un impulso RF lungo τ ha la forma di un sinc centrato sulla portante f_c e che la distanza fra lo zero a destra e quello a sinistra di f_c (che definiscono quello che è chiamato il lobo principale dello spettro) distano fra loro $2/\tau$.

⁶ Questo valore (-15.25 dBm) supera (come deve) il valore (-50.24 dBm) che si legge in Fig. 4, ottenuta con RBW di 30kHz. La differenza fra questi due valori è di 34.99 dB. La spiegazione sta, ovviamente, nella *desensitization* dovuta alla RBW (30kHz) che è insufficiente quando si ha a che fare con un impulso di durata $\tau = 0.5 \mu\text{s}$. Infatti, e inseriamo questi dati e $K = 1.2$ nella (3) si ha $\alpha_p = 20 \cdot \text{Log}(5 \times 10^{-7} \times 1.2 \times 30 \times 10^3) = -34.9 \text{ dB}$, in ottimo accordo con la riduzione osservata.

come abbiamo riferito nel §4.1.1, risulta di 5.45 GHz) e con RBW di 10 MHz. Quindi, per visualizzare gli impulsi che formano il segnale radar, si imposta lo sweep time (SWT) su un valore che dipende dalla scala temporale a cui vogliamo osservare il fenomeno⁷ e si aggiusta il livello del trigger video appena sotto il livello del picco più elevato, in modo da ottenere un sincronismo sufficientemente stabile. Una volta scelti il valore di SWT e il livello di trigger, si "congela" l'immagine usando la modalità *single sweep* che permette di misurare l'altezza del picco e la sua durata in tutta comodità.

La Fig. 6 mostra l'immagine di un impulso ottenuta con SWT di 2 μ s. La durata dell'impulso, misurata a metà ampiezza, risulta di 484 ns (da confrontare con il valore nominale di 0.5 μ s); si noti il trigger impostato a circa l'80% del picco. L'altezza del picco risulta di 35.4 mV, o, in dBm, -16.01dBm

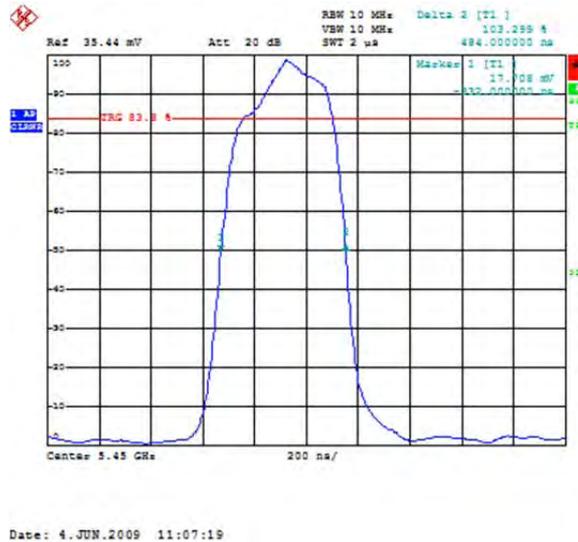


Fig. 6 - Impulso del radar ricevuto nel punto 1, con lo SA sintonizzato su 5.45 GHz, RBW 10 GHz, modalità "ZERO SPAN".

Considerando questi due valori (-15.25 dBm, ottenuto dalla misura nel dominio delle frequenze e -16.01 dBm, ottenuto nel dominio del tempo) come misure sostanzialmente indipendenti, si può assumere come valore del segnale di picco la media fra i due, che vale -15.63 dBm. Usando questo valore nella (2) si ottiene $E_{\text{picco}} = 28.41$ V/m.

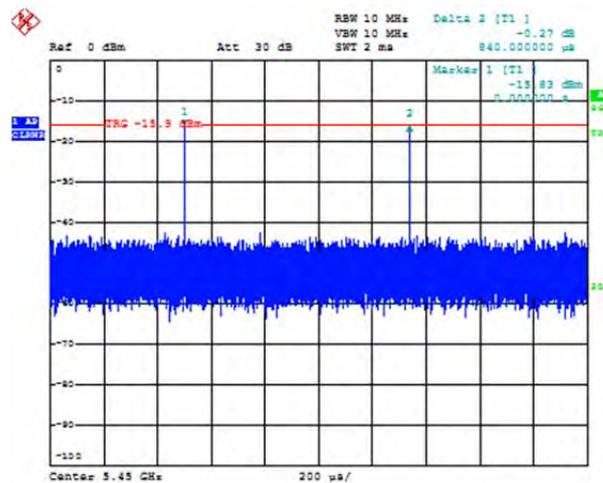
4.1.3 - Misura della frequenza di ripetizione, della larghezza del fascio e della velocità di rotazione dell'antenna

Aumentando il valore dello sweep time fino ad alcuni millisecondi si possono visualizzare alcuni degli impulsi e misurare il tempo di ripetizione T_R . Ad esempio, con la scelta $SWT = 2$ ms e aggiustando il livello del trigger video come detto nel precedente § 4.1.2, si vedono due impulsi, distanziati fra di loro da un tempo di ripetizione $T_R = 840$ μ s (Fig. 7). L'ampiezza degli impulsi (-15.83 dBm) è praticamente la stessa di quella che abbiamo già riportato.

Per misurare la velocità di rotazione oppure il tempo di rotazione T_{Rot} (che ne è il reciproco) è necessario aumentare ulteriormente lo sweep time fino a portarlo ad essere un po' maggiore della durata di

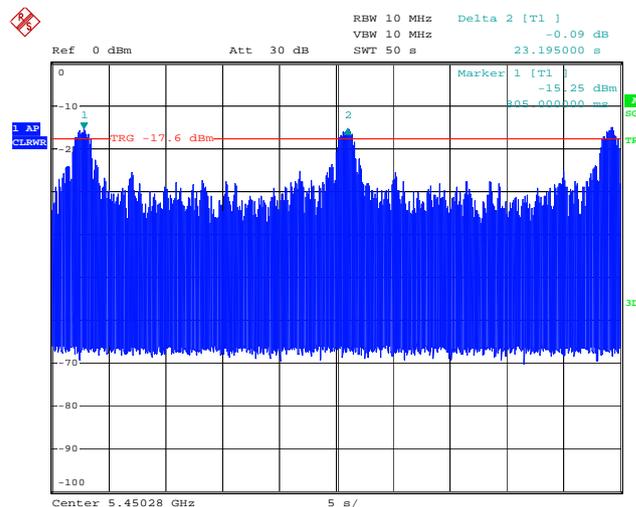
⁷ Come è ben noto, il segnale di un radar meteorologico è costituito da sequenze di impulsi corti (1 μ s e anche meno), relativamente potenti (200-700kW, di potenza di picco), ripetuti ad intervalli dell'ordine del millisecondo e che si presentano nella ristretta finestra temporale costituita dal tempo in cui il fascio del radar passa sul punto di misura. Si hanno quindi diverse scale temporali: (1) il microsecondo, per visualizzare il singolo impulso; (2) uno o più millisecondi per visualizzare due o più impulsi; (3) diversi secondi, per poter osservare una intera rotazione dell'antenna. Il fenomeno ha anche un'altra scala temporale che è quella del periodo della portante a microonde ($1/5.45\text{GHz} = 0.1835\text{ns}$) e questa informazione è già stata ottenuta osservando lo spettro nel dominio della frequenza, mentre i dati su forma, durata e cadenza degli impulsi, si possono ottenere operando in modalità ZERO SPAN. Lo SA permette dunque di acquisire tutte le informazioni necessarie per una caratterizzazione del radar come sorgente di campi EM ambientali.

un'intera rotazione dell'antenna, che nel nostro caso stimiamo dell'ordine di una ventina di secondi⁸. Con $SWT = 50$ secondi si ottiene l'immagine mostrata in Fig. 8, dalla quale si deduce $T_{Rot} = 23.2$ sec.



Date: 4 JUN 2009 10:52:49

Fig. 7 - Visualizzazione degli impulsi a ZERO SPAN, sweep time 2 ms.



Date: 4 JUN 2009 10:29:36

Fig. 8 - Sequenza degli impulsi registrati nel punto 1 (Museo Cervi) con lo SA in modalità ZERO SPAN e scala dei tempi di 50 secondi. E' ben distinguibile la concentrazione di energia intorno agli istanti in cui la parabola dell'antenna è diretta verso il punto di misura.

Veniamo infine alla larghezza del fascio. Per misurare questa quantità è necessario essere nel campo lontano. Infatti, nel campo vicino il fascio non è ben formato ed il tempo di illuminazione varia al variare della distanza.

Note la dimensione dell'antenna (diametro D , circa 5 m) e la frequenza di operazione del radar (5.45 GHz), si può stimare che la zona di campo lontano ($2D^2/\lambda$) inizi a circa 900 m. Il punto di misura 1, che dista dall'antenna solo 72.5 m, è pertanto nel campo radiativo vicino. Vedremo nel § 4.2 che invece il punto di misura 2 si trova sicuramente nel campo lontano; lì la larghezza angolare del fascio è indipendente dalla distanza e la sua misura risulta di circa 1 grado⁹.

⁸ In questo caso la stima è facile perché il radar non ha radome e basta osservare le rotazioni dell'antenna.

⁹ Un'antenna di grandi dimensioni, quale quella di questo radar ($5m/\lambda \cong 90$ lunghezze d'onda), concentra l'energia elettromagnetica in una zona ristretta in direzione del proprio asse anche quando si è nel campo radiativo vicino (Regione di Fresnel), come si vede chiaramente dalla Fig. 8. L'ampiezza angolare del "fascio" si restringe man mano che ci si allontana dall'antenna, fino a che essa non cambia più allorché si raggiunge la regione di campo lontano

4.1.4 - Valutazione del valor medio

Per prima cosa calcoliamo la potenza media senza tener conto della rotazione dell'antenna. Questa valutazione è un dato spesso richiesto, poiché questa è la potenza a cui si le persone possono risultare esposte nel caso che un guasto blocchi l'antenna quando questa si trovi orientata nella loro direzione.

Si parte dalla potenza di picco. Al valore di -15.63 dBm (di cui si è detto nel §4.1.2) corrispondono 0.027 mW che moltiplicati per la durata dell'impulso (484 ns) danno luogo a 1.31×10^{-8} mJ per impulso e quindi, dividendo per il periodo di ripetizione degli impulsi (0.840 ms), risulta che la potenza media (ad antenna ferma) vale 1.56×10^{-5} mW.

Per ottenere il campo elettrico in V/m si utilizza la (2) dopo aver espresso la potenza media in dBm (1.56×10^{-5} mW equivalgono a -48.1 dBm) e si ottiene -3.4 dBV/m, corrispondenti a 0.68 V/m. Il campo elettrico ad antenna ferma vale 0.68 V/m.

Quando l'antenna ruota, la potenza media a cui si è esposti è ulteriormente ridotta per un fattore che possiamo, con buona approssimazione, valutare come il rapporto fra larghezza a metà potenza (3 dB) del lobo principale dell'antenna e il periodo di rotazione. Dalla Fig. 8 si valuta in 1.33 sec la larghezza del lobo a -3 dB e quindi il suddetto rapporto di riduzione vale $1.33 \text{ s}/T_{Rot} = 1.33/23.2 = 5.7 \times 10^{-2}$ corrispondente a -12.44 dB. Sottraendo questo valore dai -3.4 dBV/m trovati nel caso dell'antenna ferma, si arriva a -15.84 dBV/m con l'antenna in rotazione. Passando dai dBV/m ai V/m si ha pertanto per il campo medio 0.16 V/m.

4.2 - Misure nel punto 2 (Caprara)

Il punto di misura 2 (coordinate GPS 44.78250 10.508627) si trova a distanza di 1236 metri dal radar e quindi, per le considerazioni fatte nel precedente § 4.1.3, siamo nel campo lontano irradiato dall'antenna.

Le grandezze che ci interessa conoscere sono, al solito, la potenza di picco e la potenza media. Non è però necessario misurare di nuovo la frequenza della portante f_c , la larghezza degli impulsi τ , il tempo di ripetizione T_R e il tempo di rotazione T_{Rot} che, ovviamente, sono rimasti gli stessi di quelli già acquisiti nel punto 1.

Le procedure per misurare la potenza di picco e per ricavare la potenza media sono le stesse di quelle utilizzate nel punto 1 e saranno ora soltanto brevemente ricordate, soffermandoci un po' più in dettaglio sulla valutazione della larghezza del fascio dell'antenna.

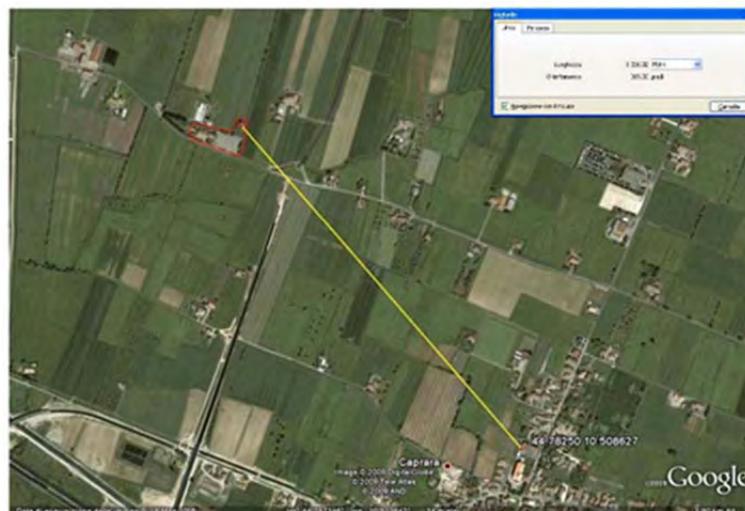


Fig. 9 - Vista panoramica della posizione del radar e del punto di misura 2 (Caprara) e misura della distanza fra il punto di misura e il radar (immagine da Google Earth).

(Regione di Fraunhofer). Maggiori dettagli su questi concetti si possono trovare nelle sez. 2 e 3 del report [2], oppure in testi di elettromagnetismo (es. [3], p.182) o di antenne (es. [4], p. 173). Per distinguere i due fenomeni, in questa relazione, parleremo più propriamente di *fascio dell'antenna* nella regione di campo lontano, mentre chiameremo *lobo principale* la concentrazione di potenza nella regione di campo vicino.

4.2.1 - Potenza di picco, larghezza del fascio e calcolo del valor medio

Le misure di potenza di picco sono state effettuate sia nel dominio della frequenza (Fig. 11), con la traccia in modalità MaxHold, sia a ZERO SPAN, nel dominio del tempo, a due diverse scale temporali, (Fig. 11 e Fig. 12). La media fra questi quattro valori risulta: -21.09 dBm. Introducendo questo valore nella (2) si ottiene per il campo elettrico di picco il valore 15.15 V/m.

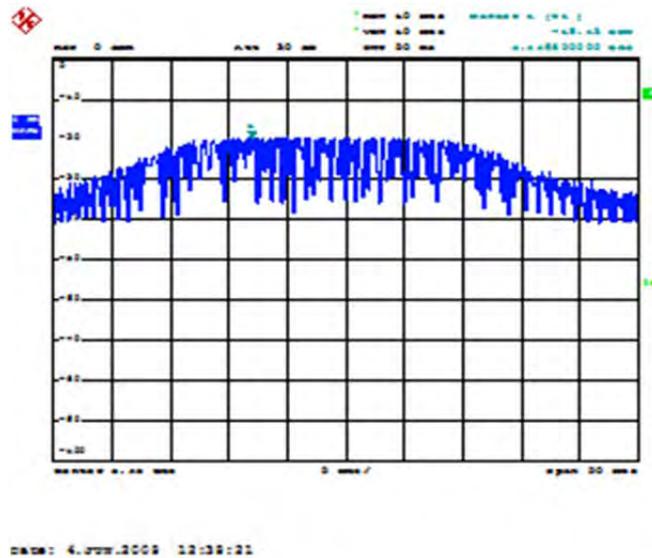
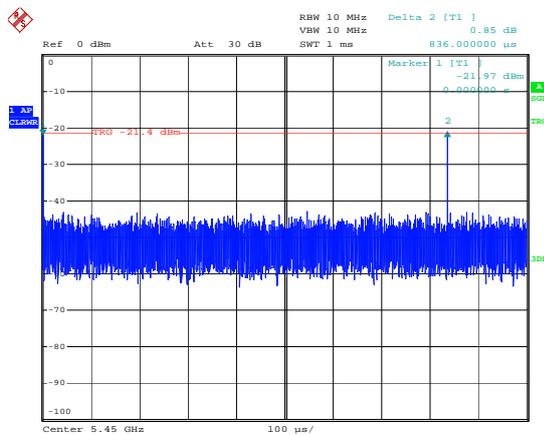
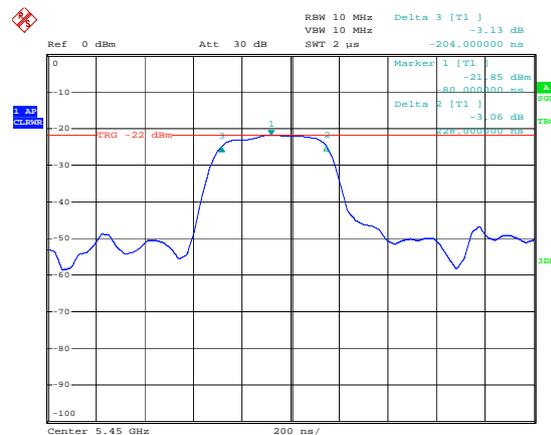


Fig. 10 - Spettro del segnale ricevuto nel punto 2; setting SA: span 20 MHz, RBW 10 MHz, MaxHold



Date: 4.JUN.2009 13:12:20

Fig. 11 - Sequenza di due impulsi visti con lo SA impostato in modalità ZERO SPAN e sweep time di 1 sec.



Date: 4.JUN.2009 13:19:11

Fig. 12 - Ingrandimento della scala temporale (SWT = 1μs) di uno degli impulsi presentati in Fig. 11. Il marker 1 è posizionato sul massimo dell'impulso; i marker 2 e 3 segnano i punti a -3dB rispetto al massimo.

Il valor medio ad "antenna ferma" si ottiene riducendo il valore di picco per il duty cycle ($\tau/T_R = 458\text{ns}/0.820\text{ms} = 5.585\text{e-}04 = -32.53$ dB) che risulta pertanto -53.62 dBm; utilizzando la (2) il campo risulta -8.92 dBV/m, ovvero 0.358 V/m.

Passiamo al valor medio con antenna rotante. La Fig. 13 mostra il segnale ricevuto nel punto 2, con lo spettro analizzatore in modalità ZERO SPAN e scala dei tempi sufficientemente lenta (SWT = 2 s.) per seguire l'antenna nel suo moto di rotazione. Come si vede, si distinguono molto bene il lobo principale dell'antenna e due o tre lobi secondari. Individuati sul lobo principale i punti a -3dB rispetto al massimo

(metà potenza), si vede che questi distano fra loro $\Delta t = 64$ ms. Rapportando questo valore con il tempo $T_{Rot} = 23.2$ sec. impiegato dall'antenna a fare un giro, si trova che la frazione di giro durante la quale, nel punto di misura, si è esposti al fascio del radar¹⁰ vale $\Delta t/T_{Rot} = 2.76e-03$; a questa frazione di angolo giro corrisponde un angolo di apertura del fascio di $360 \cdot 2.76e-03 \cong 1^\circ$.

L'ulteriore fattore di riduzione della potenza media a causa della rotazione dell'antenna vale dunque $2.76e-03$, equivalente a -25.59 dB; questo porta il valor medio della potenza a -79.21 dBm che, introdotto nella (2), corrisponde ad un campo medio di -34.51 dBV/m, ovvero $18.8 \cdot 10^{-3}$ V/m.

Notiamo infine che il valor medio andrebbe ulteriormente ridotto per il fatto che questo radar, nel suo ciclo di funzionamento standard sta acceso 2.5 minuti ogni 15 minuti. Questo porta ad una ulteriore riduzione di $10 \cdot \log(2.5/15) = -7.78$ dB e il campo medio diventa $7.68 \cdot 10^{-3}$ V/m.

5 - Analisi dei risultati

I risultati delle misure effettuate sul radar meteorologico di Gattatico (RE) sono riportati nelle seguenti tabelle.

La Tab. 1 presenta le caratteristiche del radar utili per le elaborazioni di interesse protezionistico, messe a confronto con i dati nominali forniti da ARPA Emilia Romagna. L'accordo appare ottimo e gli scarti sono sicuramente tali da portare errori non significativi sulle grandezze finali (l'intensità del campo elettrico) di nostro interesse.

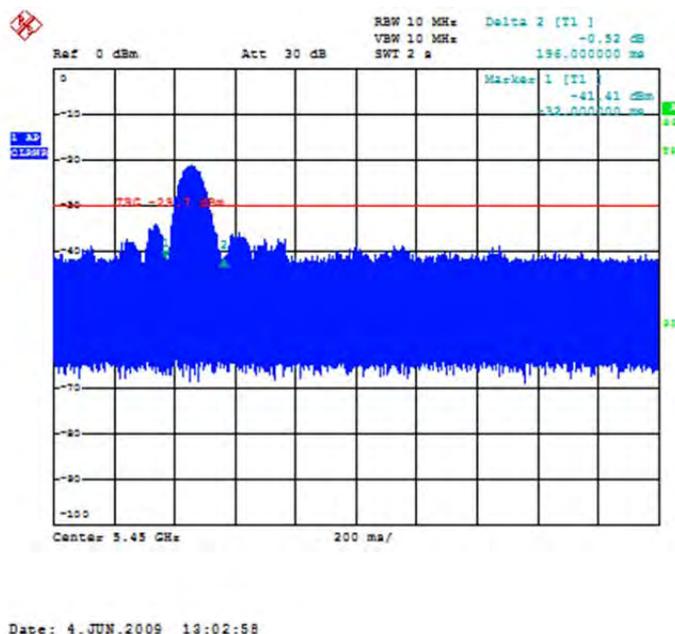


Fig. 13 - Visualizzazione a ZERO SPAN del segnale ricevuto su scala temporale di 2 sec. Si vedono chiaramente il lobo principale e alcuni lobi secondari dell'antenna.

La Tab. 2 riassume i risultati delle misure, ovvero il valore del campo elettrico di picco e quello medio, nei punti misura 1 (Museo Cervi) e 2 (Caprara). Per quanto riguarda E_{medio} si è riportato sia il valore con il radar operativo¹¹ ("antenna rotante") sia quello ad antenna ferma.

¹⁰ E' noto che per antenne molto direttive, il totale della potenza irradiata (che è concentrata sostanzialmente nel lobo principale) può essere valutato con buona approssimazione supponendo che l'intera potenza sia concentrata in un cono di apertura pari all'angolo individuato dalle direzioni a -3 dB. Si veda in proposito 2, Appendice 1.

¹¹ Si noti che in situazione di operatività standard il radar funziona per circa 2.5 minuti ogni 15 minuti, il che comporta un ulteriore fattore di riduzione della potenza media di $1/6$. Riduzioni diverse si possono avere in altre modalità di utilizzo. Tuttavia, ci preme ribadire che la procedura qui descritta utilizza quantità (durata e intensità dell'impulso; tempo di ripetizione T_R ; durata dell'esposizione Δt e tempo di rotazione T_{Rot} dell'antenna) tutti ottenibili da misure con uno SA dotato di modalità "ZERO SPAN" e con RBW sufficiente a non deformare troppo gli impulsi che costituiscono il segnale del radar.

Questi valori vanno confrontati con i limiti di riferimento comunemente utilizzati in Italia, mostrati nella Tab. 3, riportata nel seguente § 5.1. Come si vede sia i valori di picco sia i valori medi sono abbondantemente inferiori ai limiti.

Un'osservazione interessante è che se, in ogni punto, prendiamo i valori misurati, di picco o medi, e ne facciamo il rapporto con il rispettivo limite si nota che è il valore di picco ad essere più vicino al limite che non il valore medio. In altre parole si può anche dire che il rapporto fra valore di picco e valor medio è in ambedue i punti di misura superiore a 32, una situazione abbastanza tipica con i segnali radar, specie quelli con basso duty cycle.

Tab. 1 - Specifiche nominali e misurate del radar meteorologico di Gattatico (RE)

	Nominale	Misurato
Frequenza di lavoro f_c (GHz)	5.43 – 5.64	5.45
Lunghezza dell'impulso τ	0.5 μ s	0.484 μ s
Tempo di ripetizione T_R (ms) (frequenza di ripetizione f_R in Hz)	0.833 (1200)	0.840 (1190)
Periodo di rotazione T_{Rot} (sec.)	18 – 25	23.2

Tab. 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 (65.7) ^(*)	18.8 (7.68) ^(*)

(*) Il valore fra parentesi tiene conto dell'ulteriore riduzione dovuta al funzionamento intermittente del radar

5.1 - Riferimenti normativi

L'esposizione della popolazione civile ai campi elettromagnetici è regolata in Italia dal DPCM 8 luglio 2003⁵. Detto DPCM, secondo quanto affermato all'art 1 (Campo di applicazione), si applica agli impianti fissi per telecomunicazione¹² e non sarebbe utilizzabile per i campi elettromagnetici prodotti da impianti radar¹³, per i quali si rimanda ad un successivo decreto, che a tutt'oggi non è stato promulgato. Per fortuna, il comma 4¹⁴ del succitato decreto offre la possibilità di utilizzare la Raccomandazione Europea del 12 luglio 1999⁶, la quale, insieme all'ICNIRP [7], prescrive per i campi pulsati di adottare un valore limite

¹² DPCM 8 luglio 2003, art 1, comma 1. Le disposizioni del presente decreto fissano i limiti di esposizione e i valori di attenzione per la prevenzione degli effetti a breve termine e dei possibili effetti a lungo termine nella popolazione dovuti alla esposizione ai campi elettromagnetici generati da sorgenti fisse con frequenza compresa tra 100 kHz e 300 GHz. Il presente decreto fissa inoltre gli obiettivi di qualità, ai fini della progressiva minimizzazione della esposizione ai campi medesimi e l'individuazione delle tecniche di misurazione dei livelli di esposizione. In realtà, anche, se in questo comma sembra che ci si riferisca agli impianti fissi "tout court", in realtà il successivo comma

¹³ DPCM 08/07/2003, art. 1, comma 3:

"I limiti e le modalità di applicazione del presente decreto, per gli impianti radar e per gli impianti che per la loro tipologia di funzionamento determinano esposizioni pulsate, sono stabilite con successivo decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri, ai sensi dell'art. 4, comma 2, lettera a), della legge 22 febbraio 2001, n. 36.

¹⁴ DPCM 08/07/2003, art. 1, comma 4: "A tutela dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz, generati da sorgenti non riconducibili ai sistemi fissi delle telecomunicazioni e radiotelevisivi, si applica l'insieme completo delle restrizioni stabilite nella raccomandazione del Consiglio dell'Unione europea del 12 luglio 1999".

per la densità di potenza S ottenuto moltiplicando per 1000 il valore limite della densità di potenza media (mediata su 6 minuti), ovvero moltiplicando per 32 il limite per i campi a pari frequenza.

Nella Tab. 3 sono stati riportati i limiti di esposizione per la popolazione civile che è utile tener presente quando si valutano i risultati delle misure.

L'ultima riga mostra i limiti indicati nelle linee guida dell'ICNIRP[7] e nella Raccomandazione UE del 12/07/19996, mentre quelli nella prima riga sono riportati i valori di uso in Italia. Come si vede si ha a che fare con due diversi valori. I valori più elevati derivano dall'interpretazione puntuale del comma 4 del DPCM, il quale prescrive che "in assenza di una norma specifica, si applica l'insieme completo delle restrizioni stabilite nella raccomandazione del Consiglio dell'Unione europea del 12 luglio 1999" (coincidenti, come noto con le prescrizioni ICNIRP). Una interpretazione più cautelativa, che porta a valori di un ordine di grandezza inferiori di quelli ICNIRP e che è di uso molto comune in Italia, utilizza come valor medio il valore (6 V/m) previsto dal DPCM 8 luglio 2003, e per il valore di picco, del quale il DPCM non fa menzione, adotta il rationale utilizzato dall'ICNIRP di moltiplicare il valor medio per 32 ottenendo così 192 V/m.

Tab. 3 - Valori limite per il campo elettromagnetico medio e quello di picco alla frequenza del radar (5.45 GHz).

	E medio (V/m)	E picco (V/m)
Italia	6 ^(*) , 61 ^(**)	192 ^(*) , 1952 ^(**)
ICNIRP e Raccomandazione UE 12/07/1999	61	1952

(*) Interpretazione cautelativa, vedi testo.

(**) Applicazione letterale del comma 4 del DPCM 8 luglio 2003(14).

6 - Conclusioni

Abbiamo visto che con la procedura da noi divisa e qui esposta è possibile misurare tutti i parametri necessari per chi si occupa di sorveglianza ambientale. La procedura richiede l'uso di uno Spettro Analizzatore (SA) e un'antenna calibrata, adatta per la frequenza di lavoro del radar. Per applicare la procedura è necessario conoscere il fattore d'antenna (AFC) e il fattore di attenuazione del cavo che collega l'antenna allo SA.

Sono stati misurati:

- La frequenza di lavoro del radar $f_c = 5.45$ GHz, la cui conoscenza è necessaria per scegliere i limiti di sicurezza, l'AFC e l'attenuazione del cavo, che sono dipendenti dalla frequenza;
- L'intensità e la durata dell'impulso;
- La frequenza di ripetizione dell'impulso;
- Il tempo di rotazione dell'antenna
- La durata dell'esposizione a seguito della elevata direttività dell'antenna.

Questi dati sono sufficienti per ottenere le quantità (intensità di picco degli impulsi e valor medio del campo elettrico) necessarie e sufficienti per valutare il rispetto delle norme di esposizione della popolazione nel punto in cui si sono effettuate le misure.

Ricordiamo infine, anche se l'osservazione può sembrare ovvia e banale, che la forma del segnale radar esclude la possibilità di utilizzare per la misura uno strumento a rivelazione diretta. Gli impulsi sono troppo rapidi per i tempi di risposta del misuratore ed i tempi di rotazione dell'antenna sono troppo lenti per poter effettuare la misura del valor medio.

Riconoscimenti

L'attività è stata svolta in collaborazione e con il parziale supporto finanziario di ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) nell'ambito di una convenzione (prot. N. 0000032 del 09/01/2009) fra ISPRA e IFAC-CNR relativa a "studio e caratterizzazione delle emissioni elettromagnetiche di sorgenti radar".

Appendice

Tab. 4 - Caratteristiche tecniche nominali del radar meteorologico di Gattatico (RE)

Modello	GPM 500		
Frequenza di lavoro	5.43 – 5.64 GHz		
Potenza di picco	200 – 500 kW		
Durata impulso	0.5 μ s	1.5 μ s	3 μ s
Frequenza di ripetizione	1200 Hz	600 z	300 Hz
Ampiezza del fascio	0.9 gradi		
Antenna			
Diametro	5 m		
Ampiezza fascio	0.9 gradi		
Guadagno	46 dB		
Polarizzazione	Orizzontale		
Velocità di rotazione	14 – 20 gradi/secondo		
Altezza del centro elettrico	25 m		
Perdite nella guida di collegamento	2.6 dB		

Riferimenti Bibliografici

1. "Spectrum Analysis ... Pulsed RF", Agilent, Application Note N. 150-2
2. D.Andreuccetti, M.Bini, A.Ignesti, R.Olmi e R.Vanni: "Sorveglianza fisica di installazioni radar" IROE-CNR, Report N. EP/A0-I13, Giugno 1988
3. J.C.Slater and N.H. Frank: "Electromagnetism", McGraw Hill, New York, 1947
4. S.Silver: "Microwave antenna theory and design", McGraw-Hill, 1949
5. 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*.
6. 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
7. International Commission for 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)