

Misure sul Radar di Maccarese (Fiumicino -Roma)*

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

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

* Sono presenti alle misure

IFAC-CNR: Marco Bini, Amleto Ignesti, Cristiano Riminesi;

ISPRA: Claudio Baratta, Michele Riccardi, Francesca Sacchetti, Giuseppe Marsico,
Massimo Stortini.

1 - Introduzione

La misura è stata effettuata il 22/07/2009, utilizzando il furgone attrezzato di ISPRA. Il furgone è provvisto di gruppo di continuità ed è dotato di batterie che possono essere ricaricate mediante gruppo elettrogeno a motore e inverter, anch'essi alloggiati a bordo del furgone.

La strumentazione di misura, come verrà meglio precisato in seguito, è costituita da:

- Spettro Analizzatore (SA);
- Antenna Double Ridge;
- Cavo coassiale per collegare l'antenna al ricevitore.
- flash-USB per raccogliere le schermate dallo SA
- PC portatile con programmi per eventualmente pre-elaborare i dati raccolti e valutarne la plausibilità.

2 - Il radar di Maccarese

Il radar (Fig. 1) è installato su un grosso piedistallo in cima ad una collinetta vicino alla cittadina di Maccarese (comune di Fiumicino, provincia di Roma), alle coordinate GPS 41.884029 , 12.262280



Fig. 1 – Il radar di Maccarese, visto dalla postazione di misura

Si tratta di un radar per il controllo del traffico aereo (ATC, Air Traffic Control) e più precisamente per la sorveglianza di rotta (Air Route Surveillance Radar, ARSR) operante in banda L. La Fig. 2 mostra la localizzazione del punto di misura (coordinate 41.87706, 12.25590) insieme a quella del radar. La distanza fra i due punti, misurata con il telemetro è di 938.5 m e analogo valore risulta dalla misura con il righello di Google.

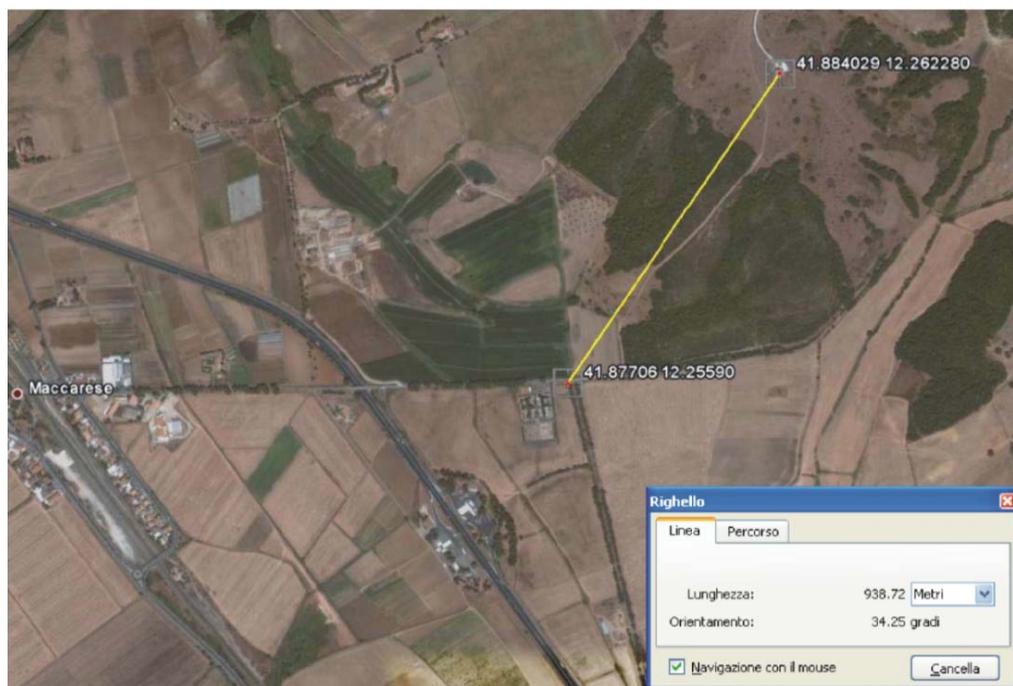


Fig. 2 – Posizione del punto di misura e del radar sito in prossimità del paese di Maccaresse

3 - Scelta delle grandezze da misurare e della procedura di misura

Come è ben noto, le quantità che è necessario conoscere per giudicare della sicurezza o meno di uno specificato sito sono sostanzialmente tre.

- La *densità di potenza media* S_m , nel punto specificato, con le medie effettuate su intervalli di 6 minuti. Nella letteratura tecnica è però consuetudine esprimere il limite con riferimento al campo elettrico E_m (espresso in V/m efficaci) di un'onda piana che trasporti la prescritta densità di potenza S_m . Si passa da S_m ad E_m mediante la nota relazione $E_m^2 = \eta_0 S_m$, con $\eta_0 = 377\Omega$, impedenza del vuoto.
- La *densità di potenza di picco* S_{pk} , che indica il valore massimo comunque raggiunto dalla densità di potenza, nel punto specificato. Anche per questa grandezza si è soliti utilizzare il campo elettrico di picco E_{pk} , legato a S_{pk} dalla relazione $E_{pk}^2 = \eta_0 S_{pk}$
- Infine, la *frequenza di lavoro*, la cui conoscenza è necessaria perché: (a) i limiti di esposizione dipendono, in generale, dalla frequenza e (b) alcune apparecchiature e/o componenti utilizzati nella catena di misura (antenna, cavo di collegamento fra antenna e ricevitore) hanno parametri (attenuazione del cavo, fattore d'antenna) che sono dipendenti dalla frequenza.

Le misure di tutte le suddette grandezze di interesse possono essere effettuate con un analizzatore di spettro moderno, mediante il quale è possibile, come vedremo, sia identificare la frequenza sia misurare il valore di picco e il valor medio del campo¹.

4 - Postazione di misura

La Fig. 3 mostra in forma schematica l'insieme degli strumenti di misura e la Fig. 4 ne offre la presentazione fotografica: l'antenna è sul cavalletto davanti al furgone e lo SA è all'interno di quest'ultimo

¹ Se la frequenza di lavoro del radar è nota, un'alternativa per misurare la potenza di picco e le altre quantità che caratterizzano il segnale (durata degli impulsi, periodo di ripetizione, larghezza del fascio e periodo di rotazione dell'antenna) con cui calcolare la potenza media, è quella di usare, al posto dello spettro analizzatore un diodo rivelatore ed un oscilloscopio digitale, come accennato nella nota 15 a pag. 1.

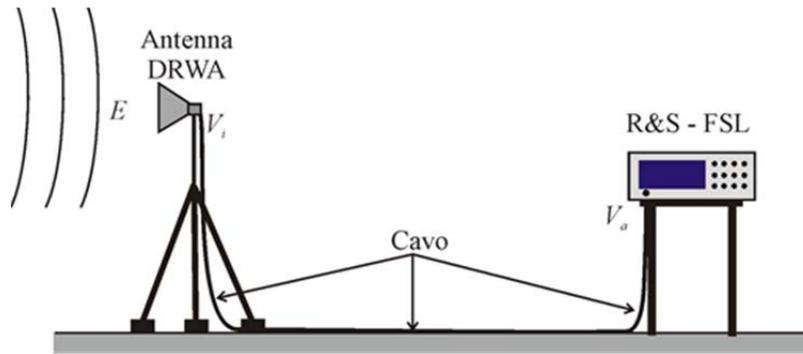


Fig. 3 - Rappresentazione schematica del set-up di misura

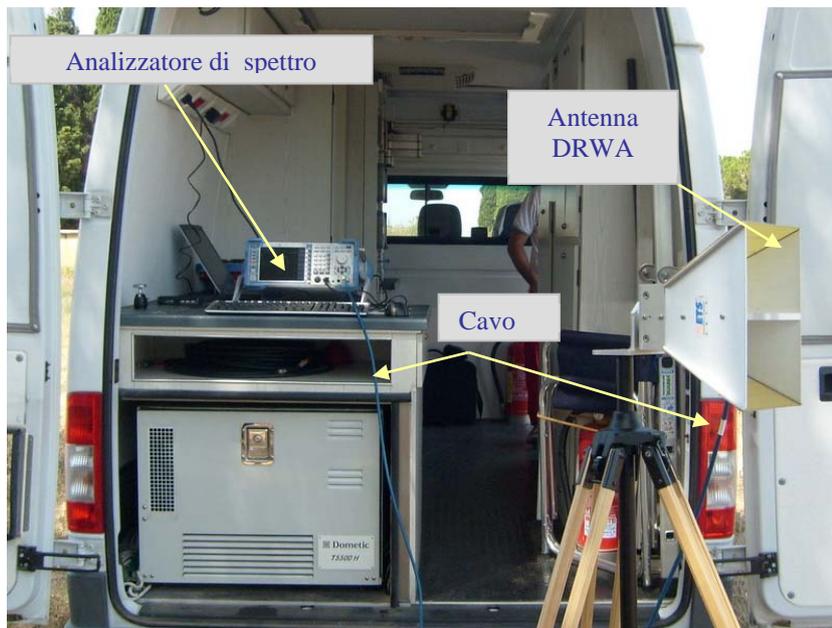


Fig. 4 – Vista della strumentazione di misura

In dettaglio, si è utilizzata questa strumentazione.

1. Antenna DRWA (Double Ridged Waveguide Antenna) ETS mod. 3115 (750 MHz – 18 GHz), Fattore d'antenna (AFC), a 1.3 GHz, 25.3 dB.
2. Cavo coassiale Sucoflex 102 A, attenuazione, a 1.3 GHz, 2.19 dB
3. Analizzatore di Spettro R&S FSL
freq. range: 9kHz–18GHz; RBW: 300Hz–10MHz; possibilità di operare in modalità ZERO SPAN.

L'onda elettromagnetica che proviene dal radar e incide sull'antenna ricevente (DRWA) viene da questa convertita in una potenza a RF (tensione V_i e corrente I_i) che il cavo provvede a trasportare allo Spettro Analizzatore. Dall'intensità del segnale V_a (dBm), misurata dall'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 derivazione²:

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

² Accenniamo ai passi per ottenere la formula (1). Per definizione $\text{AFC} = E/V_i$ e $\text{AttCAVO}_V = V_i/V_a$, per cui si ha

$$E = \text{AFC} \cdot V_i = \text{AFC} \cdot V_a \cdot \text{AttCAVO}_V = \text{AFC} \cdot (R_c \cdot P_a)^{1/2} \cdot \text{AttCAVO}$$

Calcolando $20\log_{10}$ di ambedue i membri e ricordando le definizioni delle quantità in dBm, dBV/m e dB, si ha immediatamente la (1). Notiamo che il -13 risulta dall'espressione $10\log_{10}(R_c/1000)$ nella quale il 1000 deriva dalla conversione dei watt in milliwatt ed $R_c = 50\Omega$ rappresenta sia l'impedenza caratteristica del cavo di collegamento antenna-SA che l'impedenza d'ingresso dello SA.

dove l'attenuazione del cavo e il fattore d'antenna sono, come indicato, espressi in dB. Sostituendo i valori di attenuazione del cavo (2.19 dB) e AFC (25.3 dB), indicati più sopra ai punti 1 e 2, si ottiene la semplicissima relazione:

$$E(\text{dBV/m}) = V_a(\text{dBm}) + 14.49 \text{ dB} \quad (2)$$

5 - Effettuazione delle misure

5.1 - Individuazione della frequenza di lavoro

Sappiamo che i radar "di rotta" della classe di quello in oggetto operano in banda L (1÷2 GHz). Con lo SA impostato con span che copre l'intervallo da 1 a 2 GHz e *RBW* (Resolution Bandwidth) di 10 MHz³ vediamo il "guizzo" del radar intorno a 1.3 GHz. A questo punto, impostiamo la traccia su MaxHold⁴ e notiamo che il radar opera su due distinte frequenze (v. Fig. 5). Stringendo la *RBW* e lo span, in modo da avere un maggiore potere risolutivo in frequenza, si vede che le due frequenze sono, rispettivamente, $f_1 = 1270 \text{ MHz}$ ed $f_2 = 1330 \text{ MHz}$

Le misure dei parametri di interesse (potenza media e potenza di picco) verranno ripetute per ambedue le frequenze, partendo con f_1 .

5.2 - Misure alla frequenza f_1 (1270 MHz)

5.2.1 - Misura del valore della potenza di picco e della durata degli impulsi

La misura del valore del picco può essere effettuata con lo Spettro Analizzatore in due modi: (a) nel dominio delle frequenze (uso tipico dello SA) e (b) nel dominio del tempo, sfruttando la modalità "ZERO SPAN". In ambedue i casi, per evitare risultati scorretti, è necessario aumentare la *RBW* per queste ragioni.

- (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 (3), 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:

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

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 $1/(K\tau)$, 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.

³ 10 MHz è il valore massimo di *RBW* disponibile con lo SA R&S FSL. Va impostato il valore di *RBW* più elevato per non ridurre la sensibilità dello spettro analizzatore (si veda la precisazione più avanti, §5.2.1, punto (a))

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 nella spazzolata precedente. 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.

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 $2/\tau$.

- (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 della quantità $1/\tau$ (almeno un paio di volte). E' facile verificare che questa condizione è più restrittiva di quella espressa al precedente punto (a).

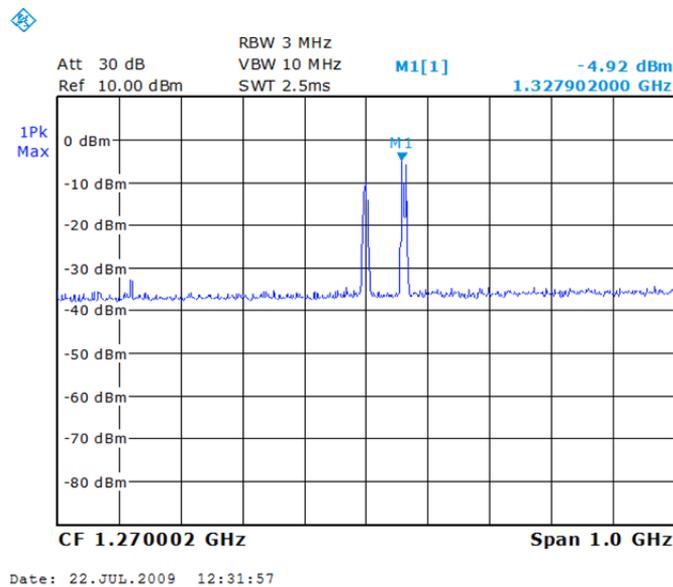


Fig. 5 - Spettro panoramico (100MHz/div) intorno alla frequenza di 1.27 GHz. Quelle che si vedono sono le due frequenze su cui opera il radar di Maccarese.

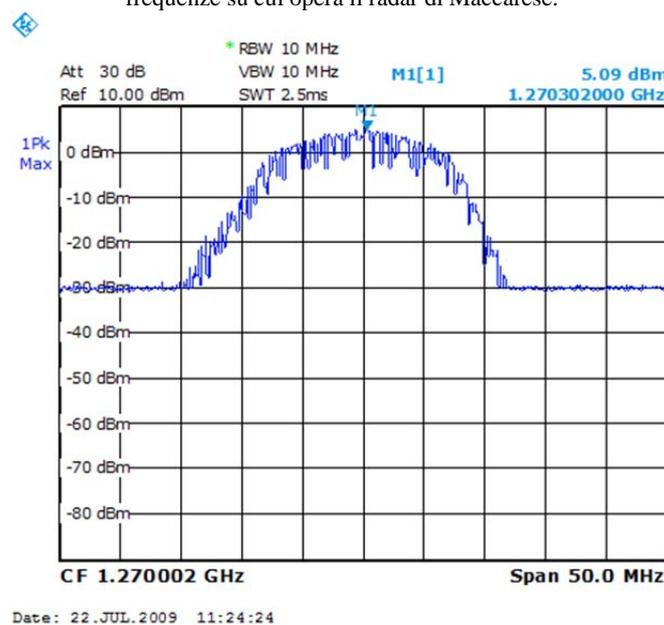


Fig. 6 - Spettro del segnale ottenuto con RBW di 10 MHz, span 50 MHz, MaxHold.

Per le ragioni su cui ci siamo testé dilungati, abbiamo dunque portato la *RBW* alla massima disponibile (10 MHz) e lo span è stato impostato su 50 MHz, in modo da inquadrare sicuramente l'intero spettro. Inoltre si è utilizzato la modalità MaxHold, per le ragioni evidenziate in una precedente nota. Il risultato della misura è mostrato nella Fig. 6. Il valore di picco risulta di 5.09dBm. Una breve nota è opportuna a proposito della scelta del parametro SWT (sweep time), qui impostato su 2.5 ms.

(i) Un approccio abbastanza rigoroso è quello di operare in *single sweep* e usare per la traccia un tempo molto lungo in modo da stazionare in ogni punto dello schermo un tempo sufficiente per acquisire un intero ciclo del segnale (praticamente uguale a T_{Rot} in questo caso). Poiché il numero di punti sull'asse orizzontale è, con lo SA in uso, $N_p = 500$ e T_{Rot} vale circa 10.5 sec (vedi, più avanti, §5.2.2), il valore per

SWT è di $N_p \cdot T_{Rot} = 5250 \text{ sec} \cong 1 \text{ ora e mezza}$. Un tempo decisamente molto lungo, non compensato dalla comodità di impostare la misura, farla partire, andarsene e tornare con comodo. Al ritorno troveremo il risultato congelato sullo schermo, grazie all'impostazione dello sweep su SINGLE.

(ii) Un'altra possibilità (che è quella che abbiamo seguita qui) è di impostare uno SWT abbastanza veloce (es $SWT = 2.5 \text{ ms}$) e la traccia in modalità MaxHold. Lo spettro del segnale si andrà man mano formando, mettendo un punto ogni T_{Rot} secondi. Per ogni data frequenza f il valore dell'ampiezza sarà quello corretto $V(f)$ se e solo se la traccia è sulla frequenza f quando l'antenna punta verso il punto di misura. Se questa coincidenza non c'è, $V(f)$ è nullo o, comunque, minore del valore corretto. Grazie alla modalità MaxHold (si veda la nota), per ogni f , $V(f)$ tende più o meno lentamente ad un valore finale che è quello corretto. Prima che questo accada, la traccia si presenta "dentellata" come si vede in Fig. 6 e il suo completamento richiede molto tempo. Il risultato che a noi interessa – ovvero il valore di picco degli impulsi che coincide con il "culmine" della campana dello spettro – può però essere apprezzato ancor prima che *tutto* lo spettro si sia regolarizzato, il che può abbreviare notevolmente la durata della misura rispetto alla modalità del precedente punto (i).

Come detto, la misura del valore di picco può essere effettuata anche nel *dominio del tempo*. Inoltre, in questa modalità è possibile misurare la durata dell'impulso. Lo SA viene impostato a "ZERO SPAN", sintonizzato sulla frequenza f_i (1270MHz) e con RBW di 10 MHz. Quindi, per visualizzare gli impulsi che costituiscono il segnale radar si imposta lo sweep time (SWT) su un valore che dipende dalla scala temporale a cui si vuole osservare il fenomeno⁶ e si aggiusta il livello del trigger video; questo deve essere appena al di sotto del livello del picco più elevato⁷. 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 in tutta comodità la durata dell'impulso e la sua altezza (che costituisce la potenza di picco).

La Fig. 7 mostra l'immagine di un impulso ottenuta con SWT di 10 μs . La durata dell'impulso, misurata a -3dB rispetto al massimo, risulta di 1.45 μs . L'altezza del picco è di 0 dBm, un valore che è 5 dB inferiore a quello misurato nel dominio della frequenza, che è da considerare però il valore più corretto per le difficoltà di agganciare l'impulso più elevato accennate nella nota⁽⁷⁾.

In conclusione possiamo assumere 5.09 dBm, quale valore di picco del segnale alla frequenza f_i . Da questo, introdotto nella (2), si ottiene infine che il valore di picco del campo elettrico vale $E_{\text{picco}} = 9.53\text{V/m}$.

5.2.2 - Misura della velocità di rotazione dell'antenna, del tempo di esposizione e della frequenza di ripetizione degli impulsi

Agendo sul valore dello sweep time si cambia la scala temporale in modo da misurare le varie quantità che – insieme alla potenza di picco e alla durata dell'impulso τ , di cui al precedente paragrafo – intervengono nella determinazione della potenza media e cioè: il tempo di rotazione dell'antenna T_{Rot} , il tempo di esposizione T_i e il tempo di ripetizione degli impulsi T_R .

⁶ Come è ben noto, il segnale radar è costituito da sequenze di impulsi, corti (1 μs e anche meno), relativamente potenti, 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 un'intera rotazione dell'antenna.

Il fenomeno avrebbe anche un'altra scala temporale, cioè quella del periodo della portante a microonde (1/3 GHz \cong 769 ps), informazione questa di scarso interesse sperimentale e che comunque è già stata acquisita dall'osservazione dello 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.

⁷ E' questo il punto più delicato della misura della potenza di picco basato sulla rilevazione dell'altezza degli impulsi visualizzati nel dominio del tempo, perché gli impulsi, "modulati" dal diagramma di radiazione dell'antenna, differiscono fra loro in altezza e, se il trigger scatta sugli impulsi più bassi, non riusciamo a vedere sullo schermo l'impulso più elevato e otteniamo una misura errata della potenza di picco. Una procedura per tentare di minimizzare l'errore è di crescere lentamente il livello del trigger fino a che nessun impulso riesce più a innescare la partenza della traccia, quindi diminuire leggermente il livello del trigger fino ad avere di nuovo l'innescato. Si tratta di un'operazione che può essere molto lunga – dato che i treni di impulsi arrivano nel punto di misura ad intervalli della decina di secondi – e che richiede l'intervento continuo di un operatore esperto per aggiustare per tentativi il livello del trigger. Per questa ragione la misura dell'altezza degli impulsi nel dominio della frequenza con la modalità (i), seppur più lunga, è da preferire, perché è meno pesante per l'operatore e alla fine di riuscita più sicura, specie per un operatore meno esperto.

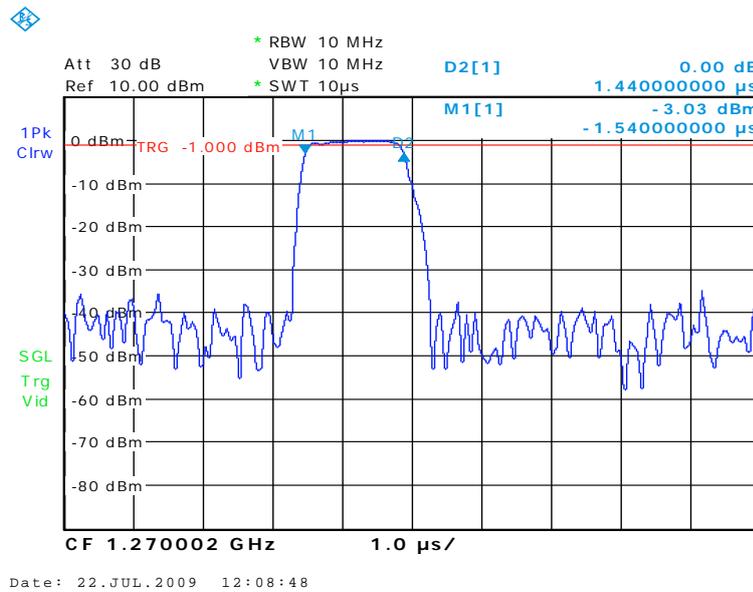


Fig. 7 - Impulso del radar ricevuto nel punto 1, con lo SA sintonizzato su 5.45 GHz, RBW 10 GHz, modalità "ZERO SPAN" .

Misura del tempo di rotazione T_{Rot} . Impostiamo il livello del trigger ad un valore un po' inferiore agli impulsi più elevati (es. TRG = 2 dBm) e il tempo di sweep su un tempo sufficientemente lungo (SWT = 20 sec) in modo da visualizzare almeno un paio di passaggi del fascio. Il risultato è mostrato in Fig. 8. Abbiamo dato al trigger un off-set di -2 sec (una divisione dell'asse orizzontale), per separare dall'origine il picco corrispondente al primo passaggio.

Posizionando due marker, uno sul picco corrispondente al 1° passaggio e l'altro sul picco relativo al 2° passaggio, si può misurare l'intervallo fra i due eventi, che corrisponde al tempo di rotazione dell'antenna e vale (vedi figura) $T_{Rot} = 10.59$ sec. Il valore M1 = 4.71 dBm, riportato dal marker n.1, è un'indicazione della potenza di picco del segnale, non molto precisa⁸ a causa dell'insufficiente potere risolutivo temporale che non permette di distinguere i singoli impulsi nel burst che indica il passaggio del fascio.

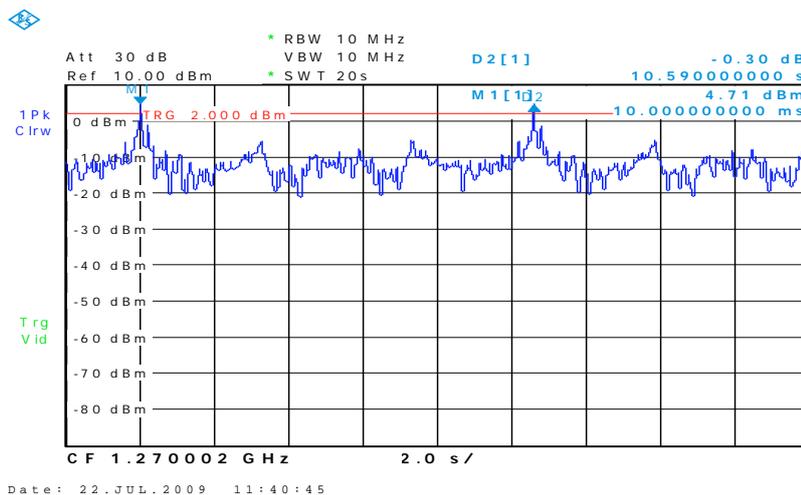
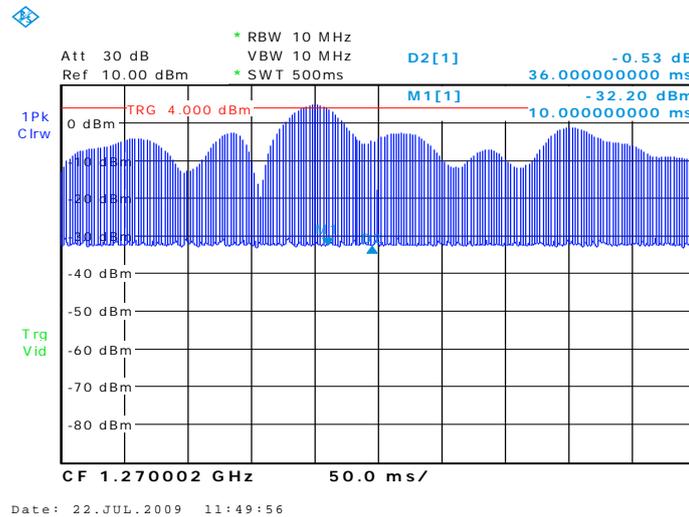


Fig. 8 – Segnale ricevuto con lo SA in modalità ZERO SPAN, sintonizzato sulla frequenza $f_1 = 1.27$ GHz e scala dei tempi di 20 secondi. E' ben distinguibile la concentrazione di energia intorno agli istanti in cui l'antenna è diretta verso il punto di misura.

⁸ Il valore qui misurato di 4.71 dBm è un po' inferiore ai 5.09 dBm visti nel §5.2.1, che abbiamo considerato la più precisa, ma è sicuramente meno scorretta degli 0 dBm, misurati con la scala temporale più veloce di Fig. 7. L'errore commesso qui ha un'origine differente: là si trattava di difficoltà nell'individuazione del picco più alto, qui di impossibilità di risolvere gli impulsi.

Misura del tempo di esposizione T_i . Sempre utilizzando il trigger video (che ora abbiamo alzato a 4 dBm) per agganciare gli impulsi più elevati, si è diminuito lo sweep time fino al valore di 500 ms. Il risultato è mostrato in Fig. 9, che rappresenta uno zoom sulla parte del segnale che mostra il passaggio del fascio del radar nel punto di misura. Come si vede, si hanno una serie di picchi corrispondenti al passaggio del lobo principale e dei lobi secondari dell'antenna. La rappresentazione in dBm rende abbastanza difficile determinare la larghezza del lobo a -3dB. A questo scopo abbiamo rifatto la figura, esprimendo la potenza in watt (più precisamente in mW) invece che in dBm (Fig. 10). Con questa rappresentazione è più facile individuare i punti metà potenza ($3.2 \text{ mW} / 2 = 1.61 \text{ mW}$) e quindi la larghezza del fascio e il tempo di illuminazione T_i , che risultano, rispettivamente 1.1 gradi e 32.33 ms.⁹



Date: 22.JUL.2009 11:49:56

Fig. 9 – Spettro analizzatore in modalità ZERO SPAN; SWT 500 ms. Si vedono il lobo principale dell'antenna e alcuni lobi secondari

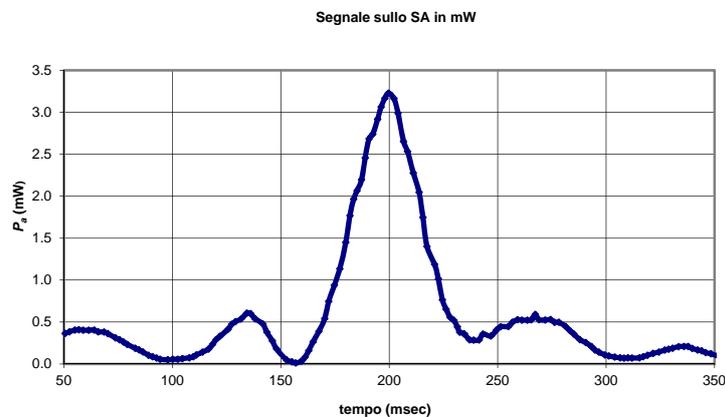


Fig. 10 – Rielaborazione della figura precedente (Fig. 9) con la scala verticale in mW invece che in dBm.

Misura del tempo di ripetizione degli impulsi T_R . Diminuendo ulteriormente il tempo di sweep fino al valore di 10 ms, si ottiene un'immagine (Fig. 11) in cui i vari impulsi (che nella precedente Fig. Fig. 9 si presentavano estremamente ravvicinati) risultano ora ben separati. Posizionando due marker su due impulsi successivi si misura il ritardo fra questi, che rappresenta il periodo di ripetizione T_R degli impulsi. Dalla figura si vede che è $T_R = 2.16 \text{ ms}$.

⁹ La quantità che viene misurata dalla Fig. 10 è la larghezza del lobo a metà potenza, che, per le antenne con fascio molto stretto, come nel caso presente, è un'approssimazione soddisfacente della larghezza del fascio θ (densità di potenza uniforme all'interno pari al massimi del lobo, zero all'esterno) e quindi del tempo di illuminazione T_i . Fra le due quantità esiste la evidente relazione $\theta = 360 \cdot T_i / T_{Rot}$, con θ espresso in gradi.

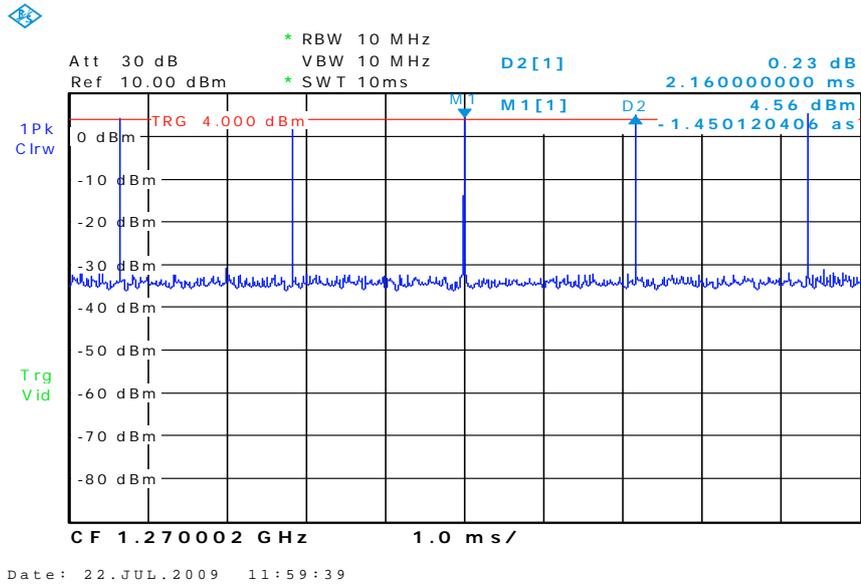


Fig. 11 - Visualizzazione degli impulsi a ZERO SPAN, sweep time 10 ms.

5.2.3 - Valutazione del valor medio

In questo paragrafo calcoliamo il valor medio della potenza trasportato dal segnale che viaggia sulla portante f_1 e da questa il campo medio E_{m1} relativo a tale portante, utilizzando la (2) (con le opportune conversioni da mW a dBm¹⁰ e poi da dBV/m a V/m¹¹). Nella §5.3 verrà fatto un analogo calcolo per la frequenza f_2 . Ovviamente, quello che interessa è il campo medio totale E_m , che risulta dal contributo di ambedue le portanti. Questo può essere ottenuto in due modi:

- (1) sommando con la regola di composizione del modulo di funzioni in media indipendenti (tale è il valore efficace del campo elettrico di segnali a frequenza diversa) e cioè secondo la formula:

$$E_m = \sqrt{E_{m1}^2 + E_{m2}^2} \tag{4}$$

- (2) ricavando la potenza media dalla somma delle potenze medie relative a ciascuna delle due portanti e da questa, convertita in dBm (nota 10) si calcola il campo medio E_m con la (2).

Anche se le due procedure danno (come deve essere e come vedremo) lo stesso risultato le eseguiamo qui ambedue, sia perché è un utile esercizio sia perché serve di controllo della esattezza dei calcoli.

Si parte dalla potenza di picco. Questa vale 3.23 mW (sono i 5.09 dBm, di cui si è detto nel §5.2.1). Moltiplicando per la durata dell'impulso (1.44 μs) si ottiene l'energia per impulso (4.65×10⁻⁶J) e dividendo per il periodo di ripetizione degli impulsi (2.16 ms) si ottiene per la potenza media (ad antenna ferma¹²) $P_{m1_Af} = 2.15 \times 10^{-3}$ mW.

Per ottenere il campo elettrico in V/m si utilizza la (2) dopo aver espresso la potenza media in dBm (2.15×10⁻³mW equivalgono a -26.67 dBm) e si ottiene -12.18 dBV/m, corrispondenti a 0.246 V/m. Dunque, il campo elettrico ad antenna ferma vale $E_{m1_Af} = 0.246$ V/m. Quando l'antenna ruota, la potenza media a cui si è esposti è ridotta del *fattore di esposizione* che, con buona approssimazione, è dato dal rapporto fra larghezza a metà potenza del lobo principale dell'antenna e il periodo di rotazione $T_i/T_{Rot} = 3.05 \cdot 10^{-3}$. Questi, espressi in dB, corrispondono a -25.15 dB che sommati (algebricamente) alla potenza media ad antenna ferma, già trovata (-25.67 dBm), danno, per la potenza media alla frequenza

¹⁰ $P(\text{dBm}) = 10 \log_{10}(P(\text{mW}))$

¹¹ $E(\text{V/m}) = 10^{\frac{E(\text{dBV/m})}{20}}$

¹² Questa indica la potenza media a cui una persona risulterebbe esposta nel caso che un guasto bloccasse l'antenna quando questa si trova orientata verso di lei. Si tratta di un'eventualità estremamente improbabile e la riportiamo qui sia perché talvolta ne viene richiesta la conoscenza sia perché il suo calcolo può essere visto come un passo intermedio per arrivare alla determinazione della potenza media e quindi del campo medio.

f_1 , -51.82 dBm, ovvero $P_{m1} = 6.57 \cdot 10^{-6}$ mW. Dalla potenza media si calcola il campo elettrico medio che incide sull'antenna, utilizzando la (2) con un la procedura già descritta e si trova $E_{m1} = 13.59$ mV/m.¹³

5.3 - Misure alla frequenza f_2 (1330 MHz)

Per le misure alla frequenza f_2 e per ottenere da queste il campo di picco e quello medio, è stata utilizzata una sequenza di operazioni che ricalcano passo per passo quelle descritte nel §5.2 per la frequenza f_1 . Anche la formula (2) rimane immutata, perché le due portanti sono così vicine fra loro ($\Delta f = 60$ MHz) che l'attenuazione del cavo e l'AC dell'antenna non variano apprezzabilmente. Notiamo però che, anche se per non allungare troppo il testo non riportiamo il dettaglio, i risultati derivano da misure specifiche e non sono stati dedotti da quelli ottenuti alla frequenza f_1 .

Le quantità relative alle dimensioni e al movimento dell'antenna trasmittente (il tempo di rotazione T_{Rot} ; l'apertura del fascio θ e quindi il tempo di illuminazione T_i) rimangono praticamente le stesse¹⁴ di quelle ottenute alla frequenza f_1 . Sono risultati invece significativamente diversi la potenza di picco, 2.97 dBm (invece di 5.09) e la durata dell'impulso¹⁵ $\tau_2 = 1.65$ μ s. Elenchiamo qui di seguito le quantità di interesse dedotte da questi dati con le procedure già illustrate e discusse nel §5.2.

- Campo di picco E_{pk2}	7.46 V/m
- Potenza media ad antenna ferma P_{m2_Af}	$1.5 \cdot 10^{-3}$ mW
- Potenza media P_{m2}	$4.58 \cdot 10^{-6}$ mW
- Campo elettrico medio ad antenna ferma E_{m2_Af}	0.205 V/m
- Campo elettrico medio E_{m2}	11.35 mV/m

6 - Densità di potenza media P_m e campo elettrico medio E_m

Come abbiamo detto, la potenza media a cui una persona è esposta si ottiene sommando le potenze medie che arrivano sulle due portanti f_1 ed f_2 utilizzate dal radar.

Prendendo i valori delle potenze medie dai risultati del §5.2.3 e del §5.3 si hanno questi valori per la potenza media ad antenna ferma

$$P_{m_Af} = P_{m1_Af} + P_{m2_Af} = 3.65 \cdot 10^{-3} \text{ mW}$$

e per la potenza media con antenna in movimento

$$P_m = P_{m1} + P_{m2} = 1.12 \cdot 10^{-5} \text{ mW}$$

Passando ai dBm e introducendo questi valori¹⁶ nella (2) si ottengono:

$$E_{m_Af} = 0.320 \text{ V/m}$$

$$E_m = 17.71 \text{ mV/m}$$

¹³ Si noti, per verifica, che il campo medio E_{m1} si sarebbe potuto trovare moltiplicando il campo medio ad antenna ferma E_{m1_Af} per la radice quadrata del fattore di esposizione T_i/T_{Rot} .

¹⁴ In realtà si sono riscontrate piccole differenze: T_{Rot} 10.56 sec. invece di 10.59 sec.; T_i 32.326ms, invece di 32.325; T_R 2.18ms, invece di 2.16ms. Si tratta però di differenze non significative che rientrano abbondantemente nella incertezza di misura.

¹⁵ Un punto che rimane irrisolto è la posizione mutua fra l'impulso alla frequenza f_1 e quello alla frequenza f_2 . E' molto probabile che i due impulsi costituiscano una coppia (un impulso viaggia sulla portante f_1 e l'altro su quella f_2) all'interno di un periodo lungo T_R , distanziati fra loro da un opportuno intervallo della durata di alcuni microsecondi. Per rendersi conto di come stiano realmente le cose sarebbe necessario utilizzare, al posto dello spettro analizzatore, un set-up costituito da un diodo rivelatore e un oscilloscopio che permetterebbe di visualizzare le sequenze di impulsi a prescindere dalla portante su cui questi arrivano. Maggiori dettagli su questo tipo di apparecchiatura e sul suo uso si può trovare nel report [2]. Purtroppo non avevamo portato con noi questo dispositivo e non abbiamo potuto soddisfare questa curiosità. Si tenga comunque presente che questa conoscenza aggiuntiva non è necessaria per esprimere il giudizio sulle condizioni di esposizione nel punto di misura, per formulare il quale sono più che sufficienti i dati raccolti con lo spettro analizzatore.

¹⁶ La quantità che nella (2) abbiamo indicato con il simbolo V_a (dBm) rappresenta la potenza del segnale presente sulla bocca del ricevitore e la (2) esprime la relazione che lega questa potenza al campo che incide sull'antenna. In questo contesto, invece che con V_a , le potenze sulla bocca sono indicate, per maggior chiarezza, con i simboli P_{m_Af} o P_m e i campi che tali potenze producono sono rispettivamente E_{m_Af} e E_m .

Come è stato anticipato al punto (1) del §5.2.3, il valor medio del campo dovuto al contributo delle due frequenze si può trovare dai valori del campo medio relativo a ciascuna delle due frequenze utilizzando la (4). Infatti:

$$\sqrt{E_{m1_Af}^2 + E_{m2_Af}^2} = \sqrt{0.246^2 + 0.205^2} \text{ V/m} = 0.320 \text{ V/m}$$

$$\sqrt{E_{m1}^2 + E_{m2}^2} = \sqrt{13.59^2 + 11.35^2} \text{ mV/m} = 17.71 \text{ mV/m}$$

Confrontando con i valori già trovati se ne vede la perfetta concordanza.

7 - Presentazione e analisi dei risultati

In sintesi i risultati delle misure effettuate sul radar di Maccarese alle frequenze f_1 ed f_2 , di cui si è riferito nelle precedenti sezioni, sono riportati nelle seguenti tabelle.

La Tab. 1 presenta le caratteristiche del radar di Maccarese risultanti dalle misure effettuate. Secondo informazioni dell'ENAV (Ente Nazionale Assistenza al Volo) il radar di Maccarese è del tipo ATCR-44K. Alcuni dati di questo tipo di radar, reperiti in rete, sono riportati nella Tab. 4 (Appendice). Purtroppo non siamo riusciti a trovare dati relativi alla forma (durata degli impulsi, periodo di ripetizione ecc.). Come si vede i valori da noi misurati sono in accordo con quelli forniti dal costruttore, quando questi sono noti. Le frequenze operative (1270 e 1330 MHz) sono centrate nella banda (1250 – 1350 MHz) lì indicata. Il periodo di rotazione di 10.59 sec. (velocità di rotazione 60s/10.59s = 5.7rpm) e l'angolo di apertura del fascio 1.1°, sono molto vicini alle specifiche. Questo accordo rassicura sulla bontà della tecnica di misura e fa confidare che sulla correttezza anche di tutti gli altri dati per i quali non abbiamo termine di confronto.

La Tab. 3 riporta il campo elettrico di picco e medio risultanti dalle elaborazioni dei dati misurati nel punto di misura specificato.

Per il campo di picco abbiamo scelto, conformemente alla definizione, il più elevato fra quelli trovati alle due frequenze.

Per quanto riguarda E_{medio} abbiamo riportato sia il valore con il radar operativo ("antenna rotante"), sia quello ad antenna ferma.

Tab. 1 - Caratteristiche del radar di Maccarese, come risultano dalle misure.

Frequenze di lavoro	$f_1 = 1.27 \text{ GHz}$	$f_2 = 1.33 \text{ GHz}$
Durata dell'impulso ¹⁷	$\tau_1 = 1.44 \text{ }\mu\text{s}$	$\tau_2 = 1.65 \text{ }\mu\text{s}$
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;	

Tab. 2 - 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} (V/m) "antenna ferma"	0.320
E_{medio} (mV/m) "antenna rotante"	17.71

¹⁷ Come si vede la durata degli impulsi τ_1 e τ_2 che modulano le due portanti sono molto simili fra loro (differenza del 13%). Potrebbe venire il sospetto che i due impulsi abbiano in realtà uguale durata e che la differenza sia di fatto dovuta a imprecisione di misura. Però un'analisi della procedura di misura e delle cause di errore ci porta piuttosto a credere che τ_1 e τ_2 siano davvero diversi. Di conseguenza come tali sono stati trattati nel calcolo della potenza media.

Tab. 3 - Valori limite per il campo elettromagnetico medio e quello di picco alla frequenza del radar (1.3 GHz).

	E medio (V/m)	E picco (V/m)
ICNIRP e Raccomandazione UE 12/07/1999	49,6	1586
Italia	$6^{(*)}$; $49.6^{(**)}$	$192^{(*)}$; $1586^{(**)}$

^(*) Interpretazione cautelativa, vedi testo.

^(**) Applicazione letterale del comma 4 del DPCM 8 luglio 2003⁽²¹⁾.

Questi valori vanno confrontati con i limiti stabiliti di riferimento vigenti in Italia, che sono mostrati nella Tab. 3, §.7.1. Come si vede sia il valore di picco sia i valori medi sono abbondantemente inferiori ai rispettivi limiti. Quindi, nell'assegnato punto di misura, l'esposizione ai campi del radar può essere considerata del tutto sicura.

Sul confronto con i limiti può essere interessante fare un'altra considerazione, calcolando la differenza (in dB) fra il valore di picco e il suo limite e analogamente fra il valor medio e il suo limite. Per fare questo, scegliamo ad esempio, i limiti secondo l'approccio "cautelativo" (quelli con il singolo asterisco in Tab. 3)¹⁸: Il campo medio (ad antenna rotante) differisce dal suo limite per -50.6 dB, mentre il campo di picco differisce dal limite per -26.0 dB; cioè, il campo di picco è molto meno distante dal limite per il campo di picco di quanto non lo sia il campo medio dal proprio limite. Risultato equivalente si trova se scegliamo i limiti indicati dalla Raccomandazione UE (quelli con due asterischi nella Tab. 3). Questo significa che il campo di picco deve essere tenuto più sott'occhio che non il campo medio. Una maniera forse anche più semplice per arrivare alla stessa conclusione è di calcolare il rapporto $E_{\text{picco}}/E_{\text{medio}}$. Questo vale, in questo caso, 537.2 , cioè molto più di 32 che è il rapporto fra il limite per il campo di picco e quello medio.

Notiamo infine che, a nostra esperienza, questa situazione in cui $E_{\text{picco}}/E_{\text{medio}} > 32$, e quindi, il primo ad essere violato è il limite per il campo di picco, è tipica con i segnali radar, specie quelli con basso duty cycle.

7.1 - Riferimenti normativi

L'esposizione della popolazione civile ai campi EM è regolata in Italia dal DPCM 8 luglio 2003 [3]. Detto DPCM, secondo quanto affermato all'art 1 (Campo di applicazione), si applica agli impianti fissi (per telecomunicazione)¹⁹ e sembra esclusa l'applicabilità per i campi EM prodotti da impianti radar, per i quali si rimanda ad un successivo decreto²⁰, che a tutt'oggi non è stato promulgato. Tuttavia, il comma 4²¹ del succitato decreto offre la possibilità di utilizzare la Raccomandazione Europea del 12 luglio 1999 [4], la quale (insieme all'ICNIRP [5] a cui si ispira) nel caso di campi pulsati prescrive di adottare per la densità di potenza S un valore limite ottenuto moltiplicando per 1000 il (aggiungendo, cioè, 30 dB al) valore limite

¹⁸ Questi, espressi in dBV/m, valgono rispettivamente $L_m = 15.6$ dBV/m, il limite per il campo medio, e $L_{pk} = 45.6$ dBV/m per il campo di picco.

¹⁹ 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".

²⁰ 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.

²¹ 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".

della densità di potenza media²², ovvero per il campo elettrico di picco un valore limite ottenuto moltiplicando per 32 (ovvero, aumentando di 30dB) il limite per il campo medio a pari frequenza.

Tenendo presenti queste precisazioni, nella Tab. 3 sono stati riportati i limiti di esposizione per la popolazione civile da considerare quando si valutano i risultati delle misure²³.

La prima riga mostra i limiti indicati dalla Raccomandazione UE del 12/07/1999 [4] (e dalle linee guida dell'ICNIRP [5]), mentre nella seconda e ultima riga sono riportati i valori utilizzati in Italia. Come si vede, in Italia 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, 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, 192 V/m, ottenuti moltiplicando i 6V/m per 32 come previsto dal rationale ICNIRP.

8 - Conclusioni

Abbiamo visto che con la procedura da noi utilizzata e qui esposta è possibile misurare tutti i parametri di interesse per chi si occupa di sorveglianza ambientale. La misura ha richiesto l'uso di uno Spettro Analizzatore (SA) e un'antenna calibrata adatta per la frequenza di lavoro del radar.

La misura delle emissioni elettromagnetiche di un impianto radar non possono essere effettuate con strumentazione a rivelazione diretta, a causa della particolarità del segnale radar, caratterizzato da sequenze di impulsi stretti (durata dell'ordine del μ s) di potenza di picco molto elevata (centinaia di kW e anche MW), emessi con frequenza di ripetizione bassa (ordine del kHz) e quindi potenza media relativamente bassa. Inoltre il fatto che l'antenna del radar concentri la potenza in un fascio molto stretto e ruoti per esplorare lo spazio di pertinenza, aumenta la complessità della misura per la difficoltà di intercettare il fascio e per l'ulteriore diminuzione della potenza media catturata dall'antenna.

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*".

²² La media va effettuata su periodi di 6 minuti.

²³ La Raccomandazione UE, nell'intervallo di frequenza in cui cadono le frequenze f_1 ed f_2 prevede un limite per il campo medio (e quindi anche per quello di picco) che varia con la frequenza secondo la formula $1.375\sqrt{f}$, con f espresso in MHz. Questo porta ad un limite per il valor medio di 49V/m (1568V/m per il valore di picco) alla frequenza f_1 e di 50V/m (1600V/m, per il valore di picco) alla frequenza f_2 . Poiché le due frequenze sono presenti contemporaneamente, una scelta giusta per questo limite ci sembra il valore di 49.6V/m, corrispondente alla frequenza di 1300 MHz media fra le due.