

Misura del Campo EM emesso dal Radar Primario ATCR-33S
installato presso l'aeroporto di Firenze-Peretola (Firenze)

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

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

1 - Introduzione

La presente relazione riferisce sulle misure effettuate sul radar primario del tipo 33S che controlla l'avvicinamento degli aerei all'aeroporto *Amerigo Vespucci* di Firenze-Peretola, localizzato nella immediata periferia di Firenze. Data la vicinanza del radar alla sede dell'IFAC-CNR, le misure sono state ripetute più volte sia dai locali del nostro laboratorio sia da altre postazioni facilmente accessibili, in prossimità dell'aeroporto. Poiché i risultati delle misure, raccolti nei vari siti presentano una notevole concordanza, e poiché la procedura di misura usata è sostanzialmente la stessa, per limitare le dimensioni della relazione questa si limita a riferire sulle misure prese dal sito IFAC.

Questa campagna, insieme ad altre, 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, al quale rimandiamo, indica che le quantità che è necessario determinare con la misura sono, oltre alla frequenza di lavoro del radar, l'intensità del valore di picco del segnale e il suo valor medio (media effettuata su un intervallo di 6 minuti).

2 - Il radar oggetto della misura

Il radar (Fig. 1) è installato all'interno del recinto dell'aeroporto di Firenze-Peretola e fa parte della rete di controllo del traffico aereo gestita dall'ENAV (Ente Nazionale di Assistenza al Volo) la quale, nel suo insieme, copre l'intero territorio nazionale (Fig. 2).



Fig. 1 - Radar per il controllo del traffico aereo ATCR 33S dell'aeroporto di Firenze-Peretola

Molte informazioni relative agli apparati¹ che compongono la rete sono reperibili sul sito dell'ENAV <http://www.enav.it/portal/page/portal/PortaleENAV/Home/> e in documenti scaricabili dalla rete (ad es.1).



Fig. 2 - Mappa degli apparati radar della rete ENAV presenti sul territorio nazionale. Per ogni località viene indicato il tipo di radar primario¹ (cifra prima della barra) e, quando presente, il radar secondario¹.

Nel caso dell'aeroporto di Firenze-Peretola si tratta di un radar tipo ATCR-33S, dedicato all'assistenza agli aerei nella fase di avvicinamento all'aeroporto. Le caratteristiche principali di questo tipo di radar, ricavate da 1, sono riportate nella Tab. 4.

Nella Fig. 3 (costruita usando Google Earth) sono mostrate le posizioni del radar (43.807274, 11.193708) e del punto di misura (43.817465, 11.200886), localizzato in prossimità della finestra del LabSeCEM (Laboratorio Sicurezza e Compatibilità Elettromagnetica), che si trova al secondo piano del nostro istituto (IFAC-CNR, Area della Ricerca del CNR, Sesto Fiorentino, Firenze) e guarda verso l'aeroporto di Firenze-Peretola. La distanza fra i due punti è di circa 1275 m.

Nelle sezioni che seguono verranno descritte le procedure utilizzate per misurare le grandezze di interesse protezionistico nel suddetto sito.

¹ La Rete ENAV di radar per il controllo del traffico aereo è costituita da **Radar Primari** (PSR, Primary Surveillance Radar) e da **Radar Secondari** (SSR).

I **radar primari**, comprendono:

- Radar in Banda L (**ATCR-44 K/S**) per il controllo in Rotta; usati in un'area di copertura a largo raggio (circa 200 NM, 360 km) per fornire servizio agli aerei in volo da un aeroporto ad un altro.
- Radar in Banda S (**ATCR-33 K/S**) impiegati per copertura a corto raggio (circa 60 NM, 110 km) nell'avvicinamento all'aeroporto e localizzati in prossimità di un aeroporto o a più aeroporti vicini fra loro; Un

radar secondario (SSR) è costituito da un *interrogatore* a terra e da un *risponditore* (trasponder) a bordo del mobile. L'interrogatore è normalmente accoppiato con il Radar Primario (le loro antenne ruotano in sincronia) in modo da integrare le rispettive informazioni

In questa relazione ci occupiamo solo di misure su radar primario e in particolare di una radar di tipo ATCR-33S. La lettera dopo il numero (K o S), nella sigla identificativa, si riferisce al tipo di amplificatore nel trasmettitore: K sta per Klystron ed S per Stato Solido.



Fig. 3 – Mappa (da Google) della posizione del Radar dell'aeroporto di Firenze-Peretola e del punto di misura presso IFAC-CNR

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

Come già abbiamo anticipato, le quantità da misurare in una campagna per la protezione dai campi elettromagnetici sono sostanzialmente tre.

- La *frequenza di lavoro*; la determinazione della frequenza è necessaria perché (1) i limiti esposizione dipendono, in generale, dalla frequenza e (2) le apparecchiature che intervengono nella catena di misura (antenna, cavo di collegamento fra antenna e ricevitore) richiedono l'utilizzazione di parametri, quali il fattore d'antenna (AFC) e l'attenuazione del cavo (AttCAVO), che dipendono significativamente dalla frequenza.
- La *densità di potenza media* S_m (in W/m^2), che è presente nel punto di misura. Il valor medio, secondo lo standard vigente in Italia, va effettuato su intervalli di 6 minuti.
Il valore del limite viene però tipicamente riferito al valore efficace (espresso in V/m) del campo elettrico E_m di un'onda piana che trasporti la specificata densità di potenza. Le due quantità sono, come è noto, legate dalla relazione $E^2 = \eta_0 \cdot S_m$, dove $\eta_0 = 377\Omega$ indica l'impedenza dello spazio libero.
- La *densità di potenza di picco* S_{pk} , che indica il valore massimo raggiunto dalla densità di potenza, in qualsiasi momento, nel punto di misura. Anche per la densità di potenza di picco si è soliti riferirsi al campo elettrico di picco (in valore efficace²) E_{pk} legato alla densità di potenza dalla già citata relazione:
 $E_{pk}^2 = \eta_0 \cdot S_{pk}$.

La procedura che noi utilizzeremo è in grado di rilevare tutte le grandezze di interesse suddette utilizza un analizzatore di spettro moderno (nel nostro caso, Rohde&Schwarz ESPI³) e un'antenna calibrata. Vedremo anche (§.4.3.2) che, specie per visualizzare il diagramma di radiazione dell'antenna del radar, è conveniente ricorrere ad un set-up costituito da un diodo rivelatore e un oscilloscopio .

² Attenzione a non confondersi. Il termine *valore efficace* è riferito all'ampiezza della portante a microonde. Il segnale è però modulato ad impulsi e il termine *picco* si riferisce al massimo valore raggiunto dal segnale nella sua evoluzione temporale, cioè al valore efficace del campo in corrispondenza del massimo (picco) dell'impulso.

³ Per le caratteristiche di questo Analizzatore di Spettro si veda:

http://www2.rohde-schwarz.com/en/products/test_and_measurement/emc_field_strength/ESPI-Characteristics-1-7-1-1365.html

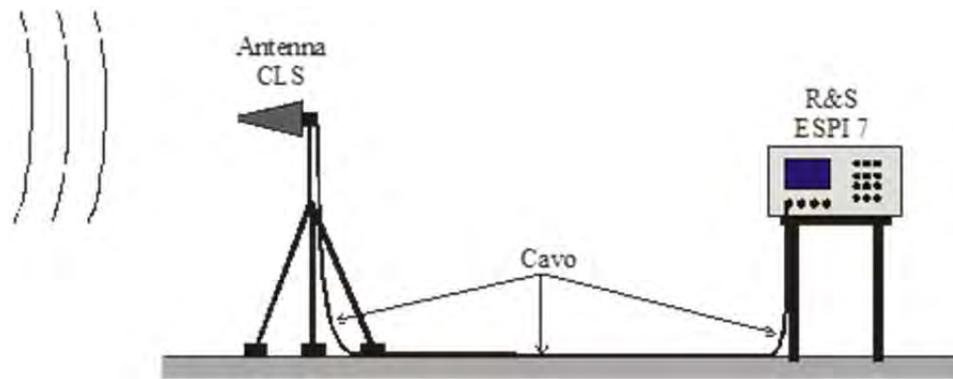


Fig. 4 -Rappresentazione schematica del set-up di misura.

La Fig. 4 mostra in forma schematica il set-up di misura, costituito dai seguenti componenti principali.

1. Antenna CLS (Conical Logarithmic Spiral) Ailtech mod. No. 93491-2 (1 – 10 GHz); Fattore d'antenna (AFC), a 2.8 GHz, $(36 + 3^4)$ dB = 39 dB.
2. Cavo coassiale tipo BNC, lunghezza 5 m; attenuazione, a 2.8 GHz, 5.8 dB
3. Analizzatore di Spettro R&S ESPI7, freq. range: 9kHz–7GHz; RBW: 10Hz–10MHz; possibilità di operare in modalità span zero e in modalità channel power.

Ricordiamo che dall'intensità del segnale V_{sd} (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:

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

dove l'attenuazione del cavo e il fattore d'antenna sono, come indicato, espressi in dB. Sostituendo i valori di attenuazione del cavo (5.8 dB) e AFC (39 dB), indicati più sopra ai punti 1 e 2, si ottiene la semplice relazione:

$$E(\text{dBV/m}) = V_{sd}(\text{dBm}) + 31.8\text{dB} \quad (2)$$

4 - Effettuazione delle misure

Le misure che qui riportiamo sono state eseguite, come detto, nel sito presso il nostro laboratorio. Il fine della descrizione è quello di illustrare con dettaglio la procedura di misura. Questa è stata ripetuta più volte a distanza anche di diversi mesi l'una dall'altra, con scarti fra i risultati ottenuti nelle varie sedute intorno ad 1 dB. Una così soddisfacente riproducibilità dei risultati è da ascrivere sia alla procedura di misura sia alla stabilità del radar oggetto di indagine.

4.1 - Individuazione della frequenza di lavoro

Poiché, come abbiamo detto più volte, vogliamo fare a meno di qualsiasi conoscenza a priori, si parte con lo SA (Spettro Analizzatore) settato con span massimo (frequenza massima 7 GHz) e *RBW* (Resolution Bandwidth) abbastanza elevata (3 MHz) per non ridurne la sensibilità.

⁴ I 3 dB aggiuntivi sono dovuti al fatto che l'antenna CLS è costruita per polarizzazione circolare; ma nel caso in cui l'onda incidente abbia polarizzazione lineare, il guadagno dell'antenna diminuisce di 3dB e l'AFC aumenta di 3dB.

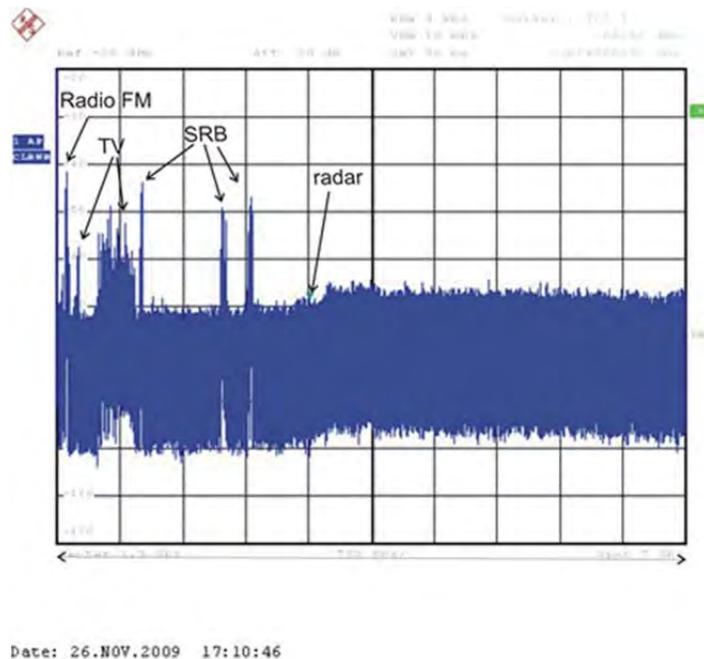


Fig. 5 - Spettro mostrato dallo SA impostato in "full span". Si vedono i ripetitori radio FM, quelli TV e le Stazioni Radio Base. Nel punto segnato con un marker si notano saltuariamente dei rapidi guizzi che denunciano la presenza di un radar.

L'immagine visualizzata sullo schermo dello SA mostra (Fig. 5) una panoramica dei segnali presenti nel punto di misura. Si riconoscono all'estrema sinistra le radio FM, poi i ripetitori TV (VHF e UHF) e quindi le stazioni radio base (SRB) GSM (900 e 1800 MHz) e UMTS (2100 MHz). Guardando con attenzione lo schermo, si percepiscono dei rapidi guizzi (non visibili, ovviamente nella figura) che sono indizio della presenza di un radar intorno alla frequenza di 2.8GHz, che segniamo con un marker.

A questo punto, esploriamo con maggiore cura la zona delle frequenze dove abbiamo visto il guizzo. Scegliamo queste impostazioni⁵ per lo SA:

- (1) Frequenza centrale, 2.8 GHz;
- (2) Span 400 MHz;
- (3) Rivelatore impostato su picco (PK);
- (4) Resolution Bandwidth (RBW), 30 kHz, in modo da avere una risoluzione in frequenza adeguata.
- (5) Traccia su MaxHold⁶ (MAXH);
- (6) Sweep time (SWT), 0.5 secondi; la misura è stata fatta proseguire per un tempo abbastanza lungo (oltre 30 minuti), per dare tempo all'immagine di formarsi completamente.

Il risultato che si ottiene, mostrato nella Fig. 6 può sembrare abbastanza sorprendente. Invece che operare su una sola frequenza, come è comune nei radar più tradizionali, il radar primario di Firenze-Peretola opera su **tre frequenze diverse**⁷.

Utilizzando la funzione marker dello SA troviamo per le frequenze questi valori:

⁵ In realtà il risultato mostrato in Fig. 6 è stato preceduto da alcuni tentativi di orientamento, con sweep time più veloce (es. 1 sec.), span più esteso (es. 1 GHz), RBW più ampia (3MHz) e, ovviamente, traccia su MaxHold (vedi successiva nota⁶).

⁶ 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 non si ha contemporaneità fra quando lo SA è sintonizzato sulla frequenza del radar e il fascio di quest'ultimo punta verso di noi, allora il segnale misurato risulterà basso e può cancellare il valore registrato in precedenza, quando, magari, si era invece verificato l'evento fortunato della coincidenza fra frequenza di sintonia dello SA e puntamento del fascio verso di noi.

⁷ Visto dal punto di misura è come se si avessero tre radar diversi. In realtà, anche se trasmessi su tre frequenze diverse, i segnali vengono in ricezioni processati insieme e le informazioni integrate fra loro. Una visione più realistica del segnale che incide nel punto di misura è presentata nel §4.3.2 (Misure con il diodo rivelatore).

$$f_1 = 2.7344 \text{ GHz}$$

$$f_2 = 2.8152 \text{ GHz}$$

$$f_3 = 2.8552 \text{ GHz}$$

Le tre righe⁸ corrispondenti alle tre frequenze, che appaiono di ampiezza pressoché identica, coprono nel loro insieme un intervallo in frequenza di circa 120 MHz e non risultano equispaziate: la distanza della seconda dalla prima è di 80 MHz, mentre la terza dista dalla seconda circa 40MHz.

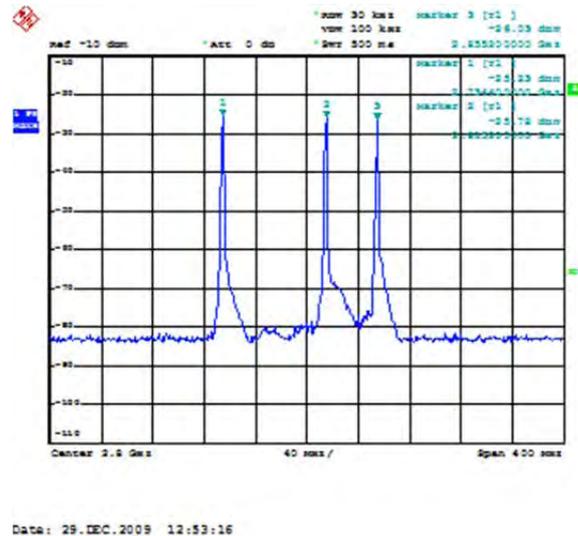


Fig. 6 - Frequenze di funzionamento del radar di Firenze-Peretola

4.2 - Misura dell'intensità di picco

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 "span zero" dello SA. In ambedue i casi, per evitare risultati scorretti, è necessario tenere elevata la *RBW* per le seguenti ragioni.

- Per quel che riguarda il dominio della frequenza, il valore di *RBW* non deve essere troppo basso, rispetto alla banda di frequenze occupata dall'impulso, in modo da evitare la riduzione in ampiezza causata dalla *desensitization* (si veda ad es. 1, pag. 18). Per questa ragione l'ampiezza delle righe mostrata in Fig. 6 non è quella corretta.
- 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).

Oltre agli accorgimenti per la scelta della *RBW* ora ricordati, la misura con una o l'altra di queste tecniche (dominio della frequenza o dominio del tempo) richiede che si usi la modalità MaxHold, per quanto già evidenziato nella nota⁶.

4.2.1 - Misura nel dominio della frequenza

Le misure debbono essere effettuate, separatamente, a ciascuna delle tre frequenze. Vedremo che, come già è stato anticipato, la potenza del segnale, sia di picco che in valor medio, è praticamente la stessa per ciascuna frequenza.

Dunque, la frequenza viene centrata, di volta in volta, su una delle tre frequenze⁹; lo span viene ridotto a 50 MHz e la *RBW* viene impostata su un valore elevato (10 MHz), per le ragioni già dette (§4.2).

⁸ Con lo span di 400 MHz, l'emissione a ciascuna delle tre frequenze appare concentrata in una riga. In realtà, come vedremo in seguito, il segnale ha uno spettro che copre, a ciascuna frequenza, una banda di oltre due MHz (vedi §4.4.2) e ha una struttura temporale abbastanza complessa (§4.3).

⁹ Per ciascuna delle tre frequenze su cui opera il radar, il valore della frequenza a cui si è stato osservato il massimo dello spettro mostra piccole differenze a seconda del valore dello span e la *RBW* impostate. Ad esempio, per quanto

Lo sweep time è lasciato su un tempo sufficientemente lungo da garantire che, per ciascun punto dello schermo, il segnale abbia percorso un ciclo completo. Ritorniamo su questo punto nel §.4.4.2, quando descriveremo la misura in modalità "Channel Power". Cominciamo dalla frequenza f_1 (2.7344GHz). Il risultato della misura è mostrato in Fig. 7. Il valore di picco risulta di -16.68 dBm.



Fig. 7 - Spettro del segnale alla frequenza f_1 , RBW di 10 MHz, span 50 MHz, SWT 2000sec.

E' utile notare che lo spettro sembra spalmarsi su una banda di oltre 10 MHz, ma, in realtà, si tratta di un artefatto: i 10 MHz sono quelli del filtro di media frequenza (RBW = 10 MHz). Una rappresentazione più veritiera dello spettro è quella che si vede nelle figure del §.4.2, dove per la misura della potenza media con la modalità Channel Power si è impostato una RBW di 30 kHz¹⁰.

Analoghi risultati si ottengono sintonizzando lo SA sulla seconda (Fig. 8) e la terza (Fig. 9) delle frequenze su cui opera il radar.

I valori della potenza di picco sono rispettivamente -17.69 dBm e -15.83 dBm. Queste quantità sono abbastanza vicine al valore misurato alla frequenza f_1 , ma non identiche¹¹. Le differenze in ampiezza, che sono dell'ordine del dB, sono probabilmente da attribuire a varie cause, molte delle quali al di fuori del controllo diretto di chi esegue la misura. Senza spendere troppe energie per raffinare la precisione della misura, i risultati possono essere sintetizzati in due valori:

- (1) **Pkm_dBm = -16.67 dBm**, ottenuto come media dei valori di picco alle tre frequenze. Questa quantità verrà utilizzata per il calcolo della potenza media (v. più avanti, §4.4.1).
- (2) **Pk_dBm = -15.83 dBm** che è il valore più elevato del segnale, indipendentemente dalla frequenza e sarà utilizzato per definire il valore di picco a cui si è esposti nel punto considerato.

riguarda f_1 , si ha 2.7344GHz dalla Fig. 6 e 2.73435GHz dalla Fig. 7, che differiscono fra loro di 50kHz (0.001.82%) una differenza ampiamente compresa nel potere risolutivo in frequenza della misura. Infatti, la distanza in frequenza fra due punti dello schermo (i punti in orizzontale sono 501) è per la Fig. 6, di $400\text{MHz}/500 = 800\text{kHz}$, e per la Fig. 7 (che è la più "precisa") di $50\text{MHz}/500 = 100\text{kHz}$. Quindi, con la possibilità di discriminare in frequenza di cui disponiamo i due valori di frequenza suddetti coincidono e prendere l'uno o l'altro come valore di f_1 è indifferente.

¹⁰ Naturalmente, l'impostazione di un valore così basso per la RBW comporta desensitization che falsifica la misura dell'intensità dello spettro.

¹¹ In effetti, poiché, come vedremo, gli impulsi, alle tre frequenze diverse f_1 , f_2 , ed f_3 costituiscono nel loro insieme un unico segnale, utilizzato dall'algoritmo di post processing per estrarre le informazioni di interesse, sarebbe naturale aspettarsi che le ampiezze alle tre frequenze fossero uguali. In realtà, si notano differenze che non sappiamo se attribuire per intero all'accuratezza della misura e se siano invece, almeno in parte, imputabili a reali variazioni dell'intensità del segnale emesso: infatti, la mancanza di conoscenza sull'algoritmo di ricostruzione non ci permette di dire se, ad esempio, già in trasmissione i segnali risultino di ampiezze un po' diverse, e che queste differenze vengano compensate successivamente, in fase di elaborazione dei segnali ricevuti.



Fig. 8 - Spettro del segnale alla frequenza f_2 , RBW di 10 MHz, span 50 MHz, SWT 2000sec



Fig. 9 - Spettro del segnale alla frequenza f_3 , RBW di 10 MHz, span 50 MHz, SWT 2000sec

4.2.2 - Misura nel dominio del tempo

Come è stato già detto, la misura del valore di picco può essere effettuata anche nel dominio del tempo.

A questo scopo usiamo lo SA in modalità "span zero", con RBW di 10 MHz. Una presentazione approfondita sull'utilizzo dello SA in modalità span zero verrà data nel §4.3, dove verranno analizzate le caratteristiche salienti del segnale ricevuto (durata e frequenza di ripetizione degli impulsi, periodo di rotazione dell'antenna, tempo di illuminazione) e alla quale rimandiamo per maggior dettaglio. Qui ci limitiamo ad illustrare l'uso dello SA a span zero per misurare l'ampiezza degli impulsi visualizzati nel dominio del tempo. A questo scopo:

- si sintonizza lo SA su una delle tre frequenze¹²;
- Si imposta lo sweep time (SWT) su un valore adatto a visualizzare le sequenze di impulsi che costituiscono il segnale radar (50 μ s in questo caso);
- si aggiusta il livello del trigger video appena sotto il livello del picco più elevato, in modo da ottenere un sincronismo sufficientemente stabile.

¹² Come già si è visto e come sarà ancora più chiaro in seguito, il segnale ha le stesse caratteristiche a ciascuna delle tre frequenze. In particolare gli impulsi hanno la stessa ampiezza, indipendentemente dalla frequenza portante.

Il risultato è visibile in Fig. 10. L'ampiezza dell'impulso vale -15.92dBm , un valore in ottimo accordo con quello misurato nel dominio della frequenza¹³ (Fig. 9).

In conclusione, assumiamo per potenza di picco degli impulsi il valore già ricordato di -15.83dBm . Introducendo questo valore nella (2) si ottiene per il campo di picco

$$E_{pk}(\text{dBV/m}) = -15.83\text{dBm} + 31.8\text{dB} = 15.97\text{dBV/m}$$

al quale corrisponde, in definitiva, un campo di picco di

$$E_{pk} = 10^{\frac{15.97}{20}} = 6.29 \text{ V/m} .$$

4.3 - Misura della velocità di rotazione dell'antenna, della larghezza del fascio, della frequenza di ripetizione e della durata degli impulsi

Lo SA in modalità span zero, permette di visualizzare nel dominio del tempo il segnale a cui si è esposti nel punto di interesse. Si possono così misurare le proprietà delle sequenze di impulsi (periodo di ripetizione, durata degli impulsi) e come questi sono modulati dalla rotazione dell'antenna. Vedremo anche che il segnale di questa tipologia di radar, per il fatto di suddividerne la trasmissione su tre frequenze, ha una struttura piuttosto complessa la cui comprensione può essere notevolmente semplificata utilizzando come strumento di misura un diodo rivelatore e un oscilloscopio, che ne permette la visualizzazione nella sua globalità.

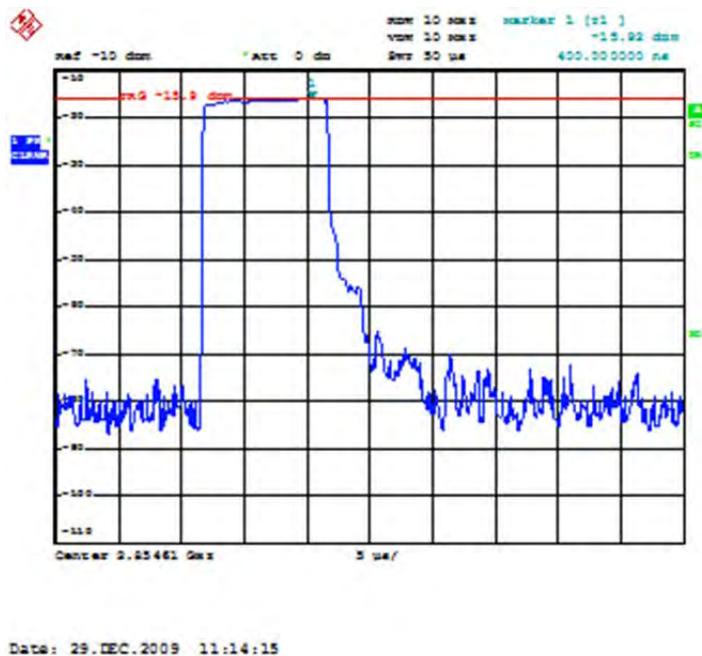


Fig. 10 - Impulso visualizzato con lo SA in modalità span zero: $\text{SWT} = 50\mu\text{s}$; $f = 2.85461\text{GHz}$; $\text{RBW} = 10 \text{ MHz}$, $\text{VBW} = 10 \text{ MHz}$;

¹³ I due valori sono, almeno in questo caso, in buon accordo. Tuttavia la procedura di misura nel dominio del tempo è intrinsecamente meno affidabile perché richiede che l'operatore aggiusti il trigger in modo da "agganciare" l'impulso più alto. Se questo non accade – e sovente non abbiamo modo di verificarlo – si ha una sottostima del valore del picco. Per questa ragione, quando è disponibile, è preferibile utilizzare la misura nel dominio della frequenza.

4.3.1 - Misure con lo Spettro Analizzatore

Lo SA in modalità span zero può essere considerato un "oscilloscopio accordato", di cui si può scegliere frequenza di accordo e banda passante, e che, grazie al filtro e all'amplificatore di media frequenza, permette di distinguere e misurare segnali in ambiente anche molto rumoroso. Variando il tempo di sweep (scelto con il comando SWT) si può scegliere la scala temporale a cui il segnale viene visualizzato. Le impostazioni tipiche dello SA, per misure nel dominio del tempo, sono le seguenti.

- Span zero;
- Frequenza, centrata sulla frequenza di lavoro del radar; nel nostro caso, una delle tre su cui abbiamo visto che opera il radar.
- RBW = 10 MHz; VBW = 10 MHz;
- Traccia in modalità Max Hold (MAXH);
- Sweep time (SWT), specificato di volta in volta, secondo la scala temporale del segnale da analizzare: la rotazione dell'antenna, il periodo di ripetizione degli impulsi, la durata degli impulsi;
- Trigger: si aggiusta il livello del trigger video per sincronizzare la traccia sulla frequenza degli impulsi¹⁴.
Se, come accade nel caso presente si hanno già informazioni sul valore dell'altezza degli impulsi avendone già effettuata la misura nel dominio della frequenza (§4.2.1), allora si può impostare il livello del trigger appena sotto il valore noto del picco degli impulsi.
Solitamente si impone poi un off-set al trigger per spostare l'impulso (o gli impulsi) verso il centro dello schermo evitando che l'inizio del segnale coincida con l'estremo sinistro dello schermo e che il fronte di salita dell'impulso si confonda con la linea verticale dell'inizio della griglia.
- Detector in modalità peak (PK).

Misura del periodo di rotazione. Con lo SA impostato come già detto, si sceglie per lo sweep time un valore di tentativo di una decina di secondi. Si agisce quindi sul trigger video per ottenere sullo schermo una figura stabile. Il risultato è mostrato in Fig. 11, per la quale si è utilizzato un off-set di -1sec. per spostare il segnale a destra di una divisione (un quadretto). Come si vede, il segnale è palesemente periodico come conseguenza della rotazione dell'antenna. Con la scala scelta (10 sec.), sono visibili un po' più di due periodi in ciascuno dei quali è presente un picco molto netto, corrispondente al passaggio del lobo principale. All'interno del picco ci sono le sequenze di impulsi che costituiscono il segnale radar, che a questa scala temporale, non sono ovviamente distinguibili. Ai lati del lobo principale, con intensità almeno 20dB inferiore, sono visibili i segnali corrispondenti ai lobi secondari.

Passando alla modalità **single sweep** si può congelare l'immagine e, posizionando due marker su due picchi successivi, si può misurare il ritardo fra questi due picchi e ottenere il periodo di rotazione dell'antenna che risulta $T_{Rot} = 3.8\text{sec}$. Semplicemente cambiando la frequenza di sintonia e senza cambiare le altre impostazioni dello SA, la misura è stata effettuata anche alle altre due frequenze, f_2 ed f_3 , ottenendo per T_{Rot} lo stesso valore di 3.8 sec., confermando che i tre trasmettitori usano la stessa antenna.

Sequenze di impulsi. Diminuendo sweep time fino a SWT = 50ms e lasciando invariate tutte le altre impostazioni dello SA si possono visualizzare gli impulsi in una scala sufficiente ad accorgersi che questi vengono emessi in sequenze abbastanza complesse. La Fig. 12 mostra gli impulsi ricevuti alla frequenza f_1 . Questi appaiono raggruppati in gruppi di 14 impulsi, di cui 7 più corti e 7 più lunghi¹⁵, separati da una zona di quasi silenzio. Inoltre, mescolati a questa che possiamo dire la sequenza più importante si vedono anche segnali di livello molto più basso (almeno 20dB sotto) e più brevi (sotto il microsecondo) di scarsa importanza per l'esposizione delle persone¹⁶.

¹⁴ In generale, la procedura più corretta sarebbe quella di partire con un valore del livello di trigger abbastanza basso (comunque, sopra il livello del rumore per evitare che la traccia sia innescata da questo) e salire fino a che la traccia non parte più; ridiscendere quindi, lentamente, fino a che il trigger torna di nuovo attivo. L'operazione risulta più comoda con sweep time veloci ed è invece più problematica con tempi di rintraccia lenti, poiché in questo caso c'è troppo ritardo fra la modifica del livello del trigger e la visualizzazione del suo effetto.

¹⁵ Vedremo fra breve che quelli corti hanno durata di 10 μs e quelli lunghi di 100 μs .

¹⁶ Questi "impulsini" sono apparsi di recente. Ad es. non sono presenti in analoghe misure fatte nell'aprile del 2007.

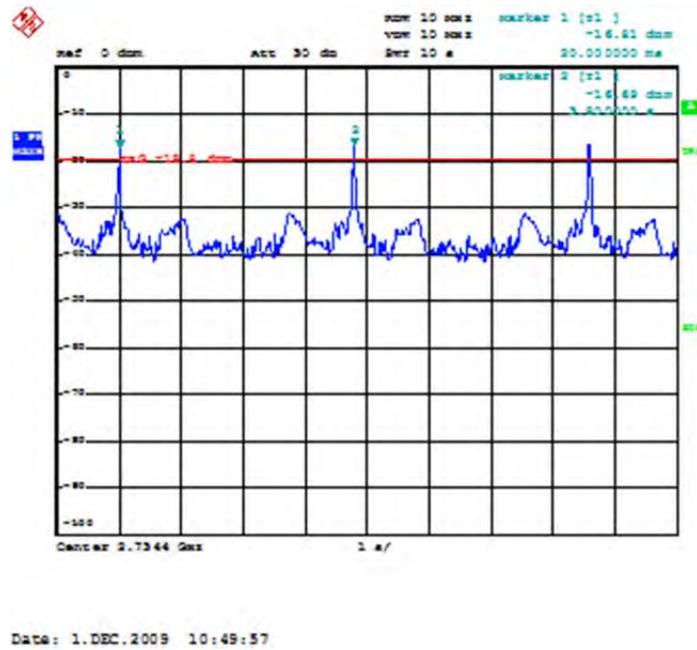


Fig. 11 – Segnale visualizzato con lo SA nel dominio del tempo, SWT = 10 sec., RBW = 10 MHz, VBW = 10MHz. I picchi corrispondono al passaggio del lobo principale dell'antenna.

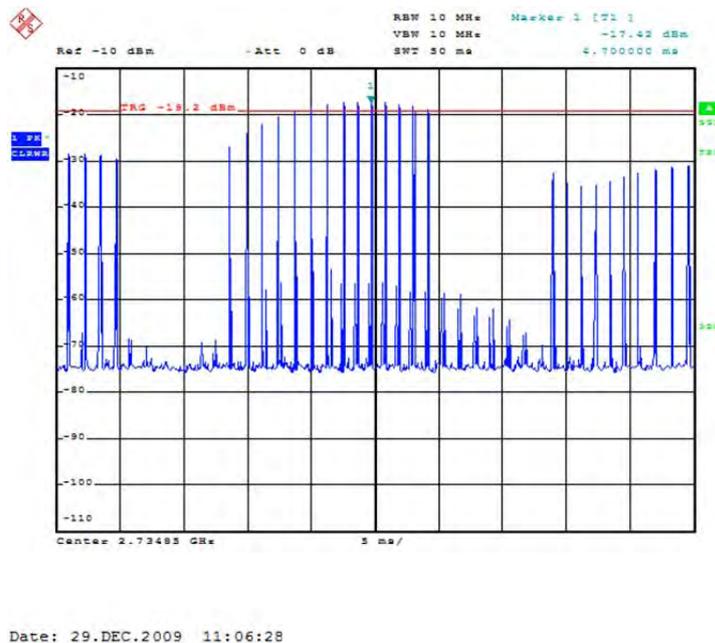


Fig. 12 – Sequenza di impulsi alla frequenza $f_1=2.7348$ GHz, SWT = 50 ms.

Analogo risultato si ottiene anche alle altre due frequenze, come si vede dalla Fig. 13 dove sono riportate le sequenze di impulsi ricevuti alle frequenze f_2 ed f_3 , insieme anche a quelli a frequenza f_1 riportati qui per confronto. Visto una frequenza alla volta, il segnale appare molto più complesso di quello che invece risulta se si visualizza prescindendo dalla frequenza. Questo aspetto verrà trattato nel §4.3.2.

Periodo di ripetizione. Diminuendo ulteriormente il valore del tempo di sweep fino ad alcuni millisecondi è possibile visualizzare e misurare la distanza dei singoli impulsi. La Fig. 14 eseguita con SWT = 5ms mostra la successione di quattro impulsi. Utilizzando due marker in modalità differenziale si trova che la distanza in tempo degli impulsi vale 1.11ms. Per il tempo di ripetizione degli impulsi si può quindi scrivere $T_R = 1.1$ ms

Durata degli impulsi. Riducendo ancora il tempo di sweep si arriva infine a visualizzare i singoli impulsi, che, come abbiamo già detto, e verificheremo esistono di due differenti lunghezze.

Con $SWT = 500\mu s$ si ottiene l'immagine degli impulsi più lunghi (Fig. 15). Dai marker 2 e 3 si ricava $(60\mu s + 41\mu s) = 101\mu s$. Poiché in altre misure abbiamo ottenuto valori leggermente minori o superiori, ci sembra corretto assumere per la durata degli impulsi lunghi $\tau_1 = 100\mu s$. Questo valore risulterà confermato dalle misure con il diodo rivelatore.

Con $SWT = 50\mu s$ si visualizza infine un impulso corto (Fig. 16). Ancora dalla lettura dei marker 2 e 3 si ha $(1.9\mu s + 8.1\mu s) = 10\mu s$. Quindi gli impulsi corti hanno una durata di $\tau_2 = 10\mu s$.

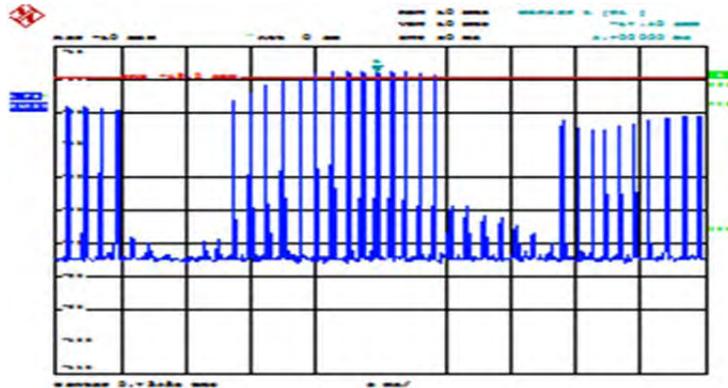
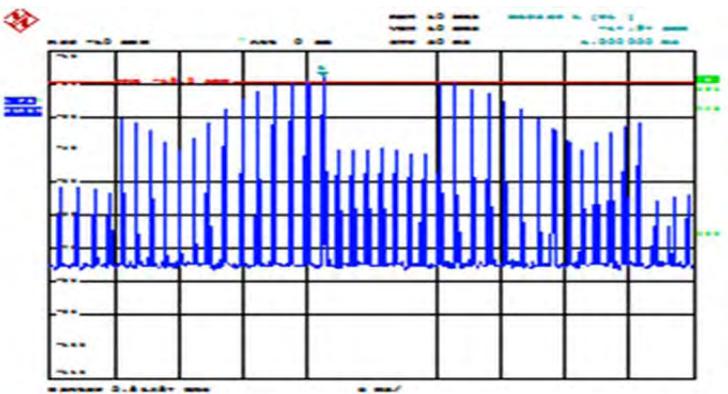
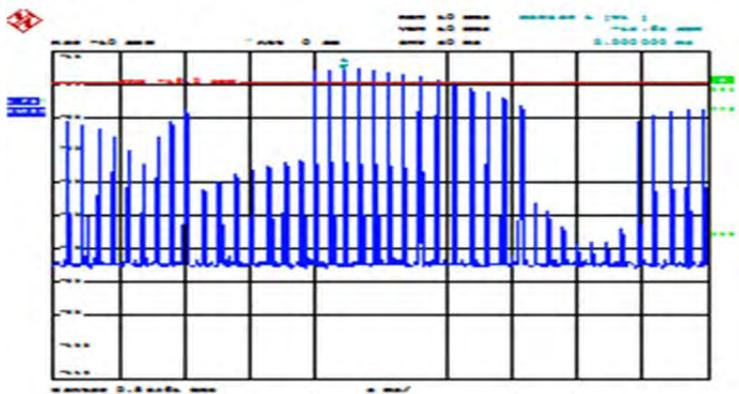
(a) $f_1 = 2.7348$ GHz(b) $f_2 = 2.81487$ GHz(c) $f_3 = 2.85461$ GHz

Fig. 13 - Sequenze di impulsi alla frequenza, $SWT = 50$ msec

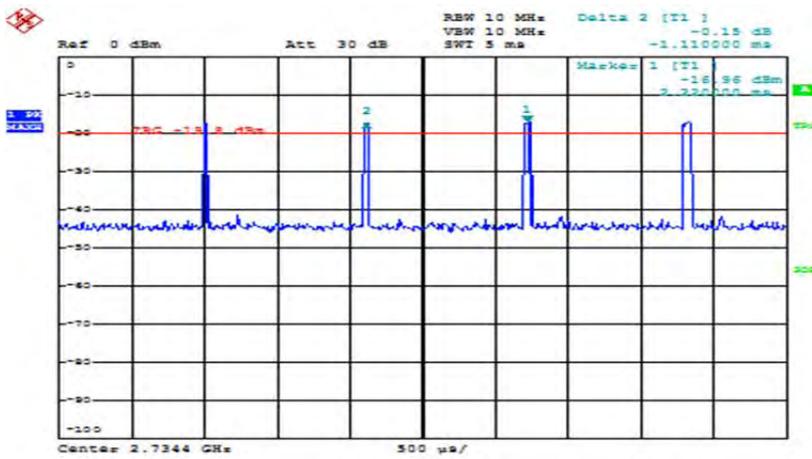


Fig. 14 – Scala dei tempi (SWT = 5ms) adatta per vedere 4 impulsi successivi.

Date: 1.DEC.2009 11:23:29

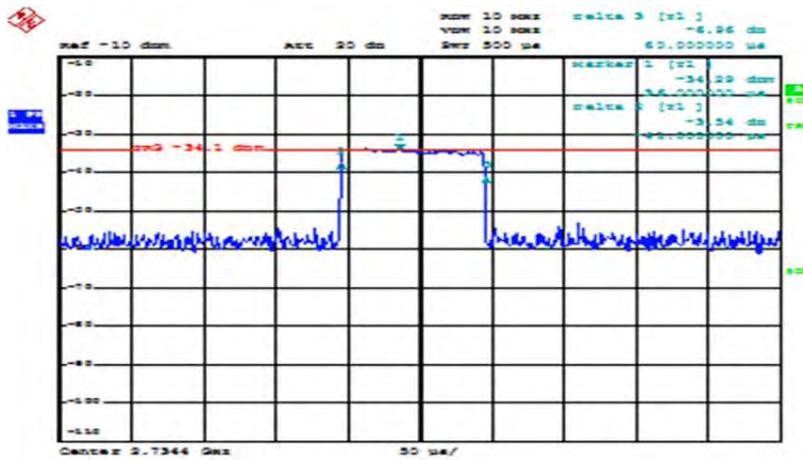


Fig. 15 – Scala 50 μs a divisione.

Date: 1.DEC.2009 12:08:53

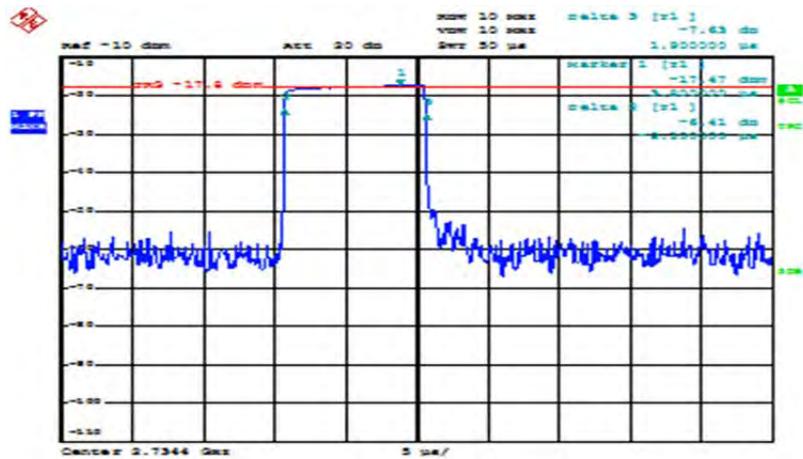


Fig. 16 – Scala 5 μs a divisione

Date: 1.DEC.2009 11:50:30

4.3.2 - Misure con il diodo rivelatore

Il modo più semplice per visualizzare il segnale radar e le sue caratteristiche è mandare il segnale captato dall'antenna ad un diodo per rivelarne l'involuppo e presentarlo sullo schermo di un oscilloscopio. Naturalmente, in questo modo, non si è in grado di dire su quale frequenza il radar stia operando e questa informazione va recuperata per altra via¹⁷.

La Fig. 17 mostra una rappresentazione schematica dei componenti del set up di misura con rivelatore a diodo. L'antenna è la solita (CLS, Ailtech mod. No. 93491-2) usata nelle misure con lo spettro analizzatore.

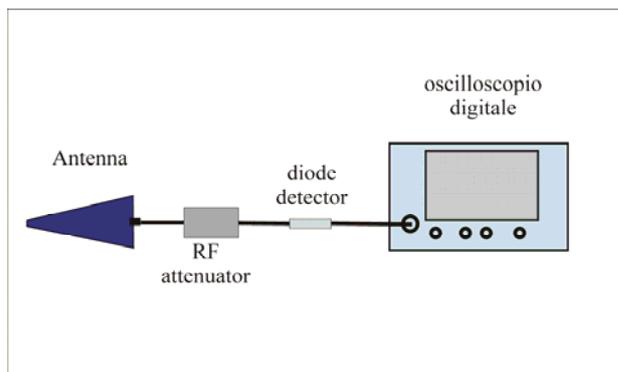


Fig. 17 – Set-up del rivelatore a diodo.

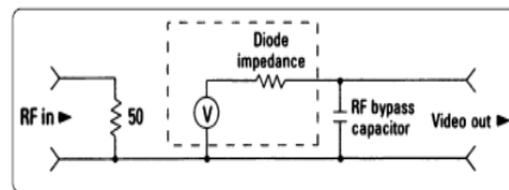


Fig. 18 - Rappresentazione schematica del rivelatore a diodo hp 8473C3

Il *diode detector* (hp 8473C, ora presente sul mercato con il marchio Agilent) è un componente già assemblato e compatto, con connettori BNC o OSM, in grado di operare da 10 MHz a 18 GHz. La Fig. 18 mostra lo schema circuitale semplificato del diodo usato come rivelatore. Visto dalla parte dell'antenna il diodo costituisce un carico resistivo di 50Ω , mentre per l'oscilloscopio collegato a valle, sul segnale rivelato, il diodo può essere rappresentato come un generatore richiuso su una capacità che filtra le componenti RF.

Il dato più utile che si può trovare nei Data Sheet del produttore è la cosiddetta "Sensibilità" V/W , la quale esprime la tensione presente in uscita quando in ingresso incide la potenza di 1 watt¹⁸. Questo parametro permette di ricavare la potenza in mW (e ovviamente anche in dBm) che dall'antenna arriva sul diodo e che può essere utilizzata in un'equazione del tipo della (1), per ricavare il campo E che incide sull'antenna.

La misura procede con modalità simile a quella utilizzata con lo SA (descritta nella precedente §4.3). Si aggiusta il trigger per innescare la traccia e si usa un tempo di sweep adeguato alla scala temporale del fenomeno che si intende osservare. Nelle figure che seguono vengono presentate le immagini con scala dei tempi man mano più veloce.

La Fig. 19, da confrontare con la Fig. 11, è ottenuta con sweep time di 5 sec. e mostra due passaggi successivi del fascio dell'antenna. L'uso dei marker permette di misurare il tempo intercorso fra i due passaggi e quindi il periodo di rotazione dell'antenna, che risulta, come si vede, di 3.8 sec, in perfetto accordo con quanto ottenuto con lo SA in modalità span zero (§4.3.1).

Il risultato sicuramente più interessante è però quello mostrato nella Fig. 20 e nelle due successive. Da queste figure si vede chiaramente che, se si prescinde dalla frequenza, il segnale si presenta, nel suo insieme, come un segnale periodico (Fig. 21), di periodo $T_R = 1.1\text{ms}$, costituito da una **coppia di impulsi** rettangolari uno corto e uno lungo di durata di $10\mu\text{s}$ e $100\mu\text{s}$, distanti fra loro $133\mu\text{s}$ (Fig. 22).

¹⁷ La conoscenza della frequenza di lavoro è necessaria perché dipendono dalla frequenza alcuni parametri della catena di misura (attenuazione del cavo, AFC dell'antenna) e i limiti di esposizione. Questa informazione può essere ottenuta da contatti con l'autorità che gestisce l'impianto oppure mediante misure, ad es. con lo SA come descritto nel §4.1.

¹⁸ Se si vuole che la tensione in uscita sia proporzionale alla potenza è necessario che il diodo lavori in "zona quadrata". Perché questo accada è necessario che la tensione di uscita non superi le decine di mV (potenze in ingresso dell'ordine delle frazioni di mW). L'attenuatore visibile nello schema di Fig. 17 ha la funzione di ridurre l'ampiezza del segnale sul diodo ai livelli perché esso operi in zona quadratica.

I gruppi di quattordici impulsi, sette corti e sette lunghi, emessi a ciascuna delle tre frequenze, sono, in realtà, fra loro sincronizzati ed intercalati in modo da dar luogo al segnale periodico di cui si è detto.

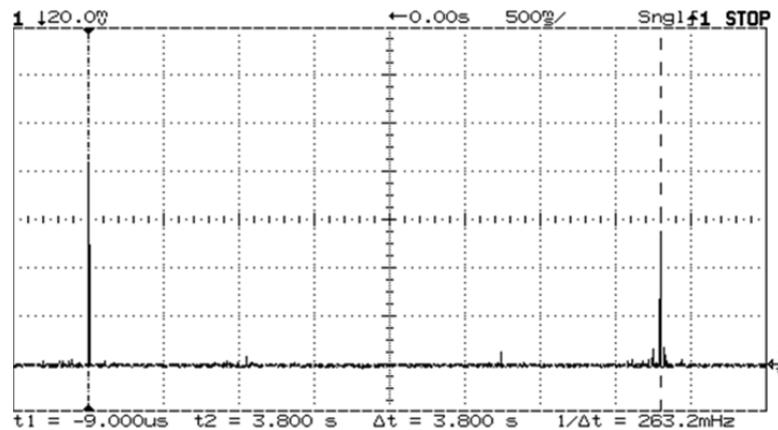


Fig. 19 – Immagine del segnale rivelato nel punto di misura con sweep time di 5 secondi. I due passaggi distano fra loro 3.8 sec.

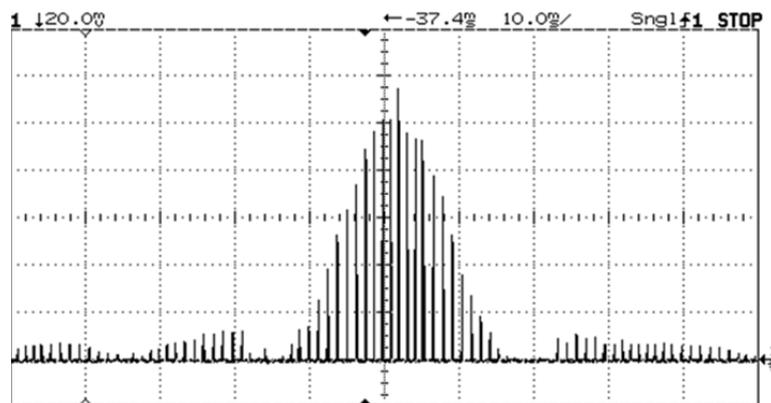


Fig. 20 – Sweep time di 100ms., si vede il lobo principale dell'antenna e due lobi secondari per parte.

A causa della rotazione dell'antenna, il segnale ricevuto nel punto di misura subisce una variazione di ampiezza che segue la forma del diagramma di radiazione dell'antenna che lo ha emesso, come è mostrato in maniera evidente dalla Fig. 20.

La misura della larghezza del lobo a metà potenza¹⁹ mostra che questa vale 14.8ms. Se facciamo il rapporto con il tempo di rotazione (3.8 s) si ottiene $\theta = 360 \cdot (14.8 \text{ ms} / 3.8 \text{ sec}) = 1.4$ gradi, valore in perfetto accordo con i valori tipici forniti per questa antenna (Tab. 4, in Appendice).

¹⁹ Questo punto necessita di una precisazione. Come si vede dalle figure, il segnale all'uscita del diodo è dell'ordine del centinaio di mV, che è fuori della zona quadratica. Avremmo potuto ridurre l'intensità del segnale con l'attenuatore, ma saremmo finiti sulla scala più sensibile dell'oscilloscopio, dove a causa rumore, avremmo ottenuto un'immagine meno efficace. Abbiamo optato per avere maggior segnale (ottenuto con un'antenna a tromba "ridged") uscendo dalla zona quadratica, dove la tensione V non è più proporzionale alla potenza a radiofrequenza che arriva sul diodo. Abbiamo calibrato il diodo (vedi Appendice) e, come si calcola interpolando la Tab. 5 di pag. 30, al picco di 102.5 mV della Fig. 20 corrispondono 0.286mW e alla metà potenza (0.143mW) corrispondono 60mV che è maggiore della metà del lobo in volt. La larghezza del lobo va pertanto misurata all'altezza di 60 mV e risulta 14.8ms.

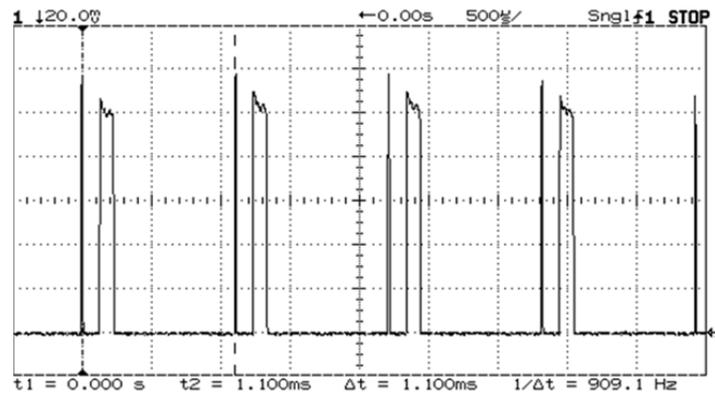


Fig. 21 - Zoom su una sequenza di impulsi (sweep time = 5ms); il segnale, formato da una coppia di due impulsi di diversa durata, è periodico, con periodo 1.1ms.

Si tratta dunque di un'antenna molto direttiva per la quale è prassi comune assumere che, con buona approssimazione, la potenza sia tutta concentrata in un fascio di larghezza θ all'interno del quale essa ha distribuzione uniforme, pari al valore massimo assunto nel lobo principale e zero altrove. Questo comporta che, per quanto riguarda l'esposizione di una persona che stazioni nel punto di misura, essa risulti esposta per un *tempo di illuminazione* T_i uguale al tempo di passaggio del fascio, cioè $T_i = 14.8$ ms.

Nella Tab. 1 abbiamo riassunto le caratteristiche del radar di Firenze-Peretola come risultano dalle misure effettuate. Non siamo riusciti ad avere i dati specifici di questo radar dall'autorità che gestisce l'impianto, però si vede che i risultati delle misure sono abbastanza in accordo con quanto riportato in letteratura per questo tipo di radar e da noi elencato nella Tab. 4 in Appendice.

4.4 - Misura del valor medio del campo

Il *valor medio del campo elettrico* E prodotto dal radar nel punto di misura viene ricavato dalla *potenza media*, inserendo questa nella relazione (2), come già è stato fatto per il campo di picco.

La potenza media può essere ricavata in due modi diversi: partendo dal valore di picco degli impulsi e calcolando la potenza media della sequenza di impulsi che arrivano nel punto di misura, come sarà mostrato nel §4.4.1, oppure mediante la misura diretta della potenza del segnale a ciascuna delle tre frequenze operative del radar con lo spettro analizzatore in modalità channel power (§4.4.2).

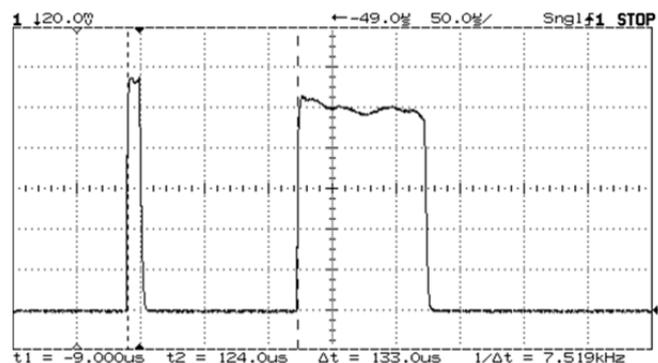


Fig. 22 – Ulteriore zoom su due degli impulsi della figura precedente (swwp time = 0.5ms); l'impulso lungo (durata 100 μ s) dista da quello corto (durata 10 μ s) 133 μ s.

4.4.1 - Calcolo del valor medio dal valore di picco

Per prima cosa si calcola la potenza media senza tener conto della rotazione dell'antenna. E' questa la potenza a cui le persone potrebbero risultare esposte nel caso che un guasto bloccasse l'antenna nel momento in cui questa è puntata nella loro direzione. Anche se è un dato che talvolta viene fornito, si tratta

di una situazione estremamente improbabile. Tuttavia l'eseguire questa valutazione, oltre che per l'improbabile utilizzo or ora detto, serve come passo intermedio per il calcolo della potenza media con antenna rotante.

Dunque, riassumendo, se si prescinde dalla rotazione dell'antenna e dalla frequenza, il segnale ricevuto nel punto di misura è costituito da coppie di impulsi uno di 10 μ s e l'altro 100 μ s che si ripetono con periodo T_R (Fig. 21). Per quel che riguarda l'energia in essi contenuta la coppia di impulsi è equivalente ad un solo impulso di durata $\tau = (10\mu s + 100\mu s) = 110\mu s$ e se indichiamo con P_k la potenza di picco degli impulsi, l'energia della coppia vale $P_k \cdot \tau$ e la potenza media nel periodo T_R si può scrivere $P_k \cdot (\tau / T_R)$. Cioè, la potenza media ad antenna ferma è data dalla potenza di picco per il fattore moltiplicativo (τ / T_R) , che rappresenta il *duty cycle* del segnale emesso dal radar. Utilizzando i dB e indicando con P_{m_Af} la potenza media ad antenna ferma questa si può mettere nella forma:

$$P_{m_Af}(\text{dBm}) = P_k(\text{dBm}) + 10 \log \left(\frac{\tau}{T_R} \right) \quad (3)$$

Utilizzando i valori di $P_k(\text{dBm}) = -16.67\text{dBm}$, $\tau = 110\mu s$, $T_R = 1.1\text{ms}$, si ottiene $P_{m_Af} = -26.67\text{dBm}$, e, dalla (2), infine un campo elettrico di $E_{m_Af} = 1.8\text{ V/m}$

Il passo successivo è quello di tener conto della rotazione dell'antenna. Per fare ciò si è soliti assumere che le persone siano esposte alla radiazione radar solo quando sono investite dal fascio principale e, più precisamente, che l'esposizione sia pari a P_{m_Af} (potenza media ad antenna ferma) per un tempo T_i uguale alla larghezza del fascio (pag. 73) e a potenza nulla per il resto del tempo di rotazione T_{Rot} . Di conseguenza la potenza media calcolata P_{mi} si ottiene moltiplicando la potenza ad antenna ferma P_{m_Af} per il "fattore di illuminazione" T_i/T_{Rot} . Se si usano i dB, il fattore di illuminazione diviene un addendo e la potenza media si scrive:

$$P_{mi}(\text{dBm}) = P_k(\text{dBm}) + 10 \log \left(\frac{\tau}{T_R} \right) + 10 \log \left(\frac{T_i}{T_{Rot}} \right) \quad (4)$$

Sostituendo i valori di $P_k(\text{dBm}) = -16.67\text{dBm}$, $\tau = 110\mu s$, $T_R = 1.1\text{ms}$ e $T_i = 14.8\text{ms}$, si ottiene:

$$P_{mi}(\text{dBm}) = -16.67\text{dBm} - 10\text{ dB} - 24.09\text{dB} = -50.76\text{dBm}$$

4.4.2 - Misura del valor medio in modalità Channel Power

In modalità CHPW (*Channel Power*) lo spettro analizzatore misura la potenza CHPWR presente in una determinata banda di frequenza, definita *Channel Bandwidth* (CHBW), eseguendo idealmente la seguente integrazione:

$$CHPW = \int_{CHBW} \frac{p(f)}{B_e} df \quad (5)$$

dove $p(f)$ indica il valore della traccia mostrata sullo SA e B_e indica la *banda equivalente impulsiva* dello SA, praticamente coincidente con la RBW. In pratica lo SA approssima l'integrale della (5) con una sommatoria su tutti i punti della traccia contenuti nell'intervallo definito dalla CHBW. Il risultato è in mW, se $p(f)$ è espresso in mW.

Per un risultato corretto si debbono rispettare le condizioni che riassumiamo qui di seguito.

- E' necessario che CHBW copra tutto lo spettro del segnale, o almeno la sua parte più significativa; nel nostro caso abbiamo valutato che 4MHz sia un valore sufficiente per CHBW.
- La RBW va impostata su un valore sufficientemente basso per poter seguire le variazioni dello spettro. Per i segnali radar con cui si ha a che fare, 30 kHz è una buona scelta;
- Il detector deve essere impostato in modalità *root mean square* (RMS) Lo sweep time (SWT) deve essere abbastanza lento. Una scelta che garantisce un risultato corretto è che la permanenza del "pennello" in un punto dello schermo sia uguale ad un *periodo* (T_{Rot}) del segnale, ovvero, se N_p è il numero di punti sull'asse orizzontale (n. di punti della traccia):

$$SWT = N_p \cdot T_{Rot}$$

Con questa scelta, nel nostro caso si ha: $SWT = 1900$ sec., che equivalgono a un po' più di mezzora. Le figure seguenti mostrano le schermate ottenute operando in modalità CHPW su ciascuna delle tre frequenze su cui opera il radar.

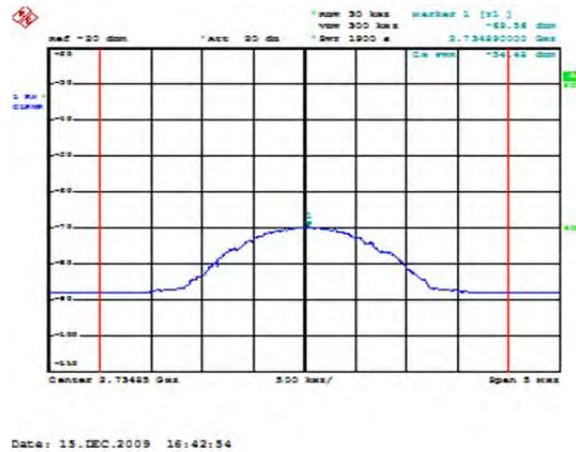


Fig. 23 - Risultato della misura della potenza media con la modalità Channel Power alla frequenza f_1 ; RBW = 30 kHz, span = 5 MHz, $SWT = 1900$ sec

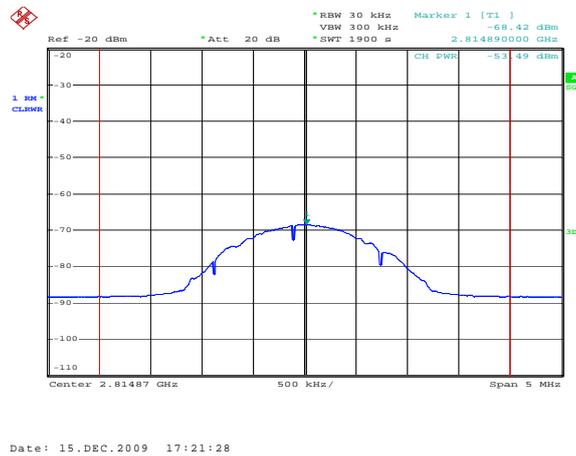


Fig. 24 - Risultato della misura della potenza media con la modalità Channel Power alla frequenza f_2 ; RBW = 30 kHz, span = 5 MHz, $SWT = 1900$ sec.

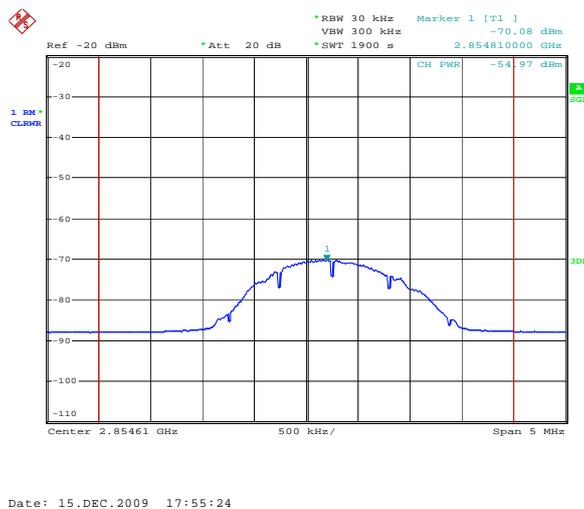


Fig. 25 - Risultato della misura della potenza media con la modalità Channel Power alla frequenza f_3 ; RBW = 30 kHz, span = 5 MHz, $SWT = 1900$ sec

Il risultato della misura è per le tre frequenze il seguente:

$$\begin{aligned}
 \text{frequenza } f_1: \text{ CHPW} &= 54.48 \text{ dBm} \\
 \text{frequenza } f_2: \text{ CHPW} &= 53.49 \text{ dBm} \\
 \text{frequenza } f_3: \text{ CHPW} &= 54.97 \text{ dBm}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Le quantità sono fra loro molto vicine (scarto massimo circa 1 dB). Le differenze non sono probabilmente da imputare alla incertezza delle misure, ma a reali differenze dei segnali emessi, che vengono poi magari compensati in fase di elaborazione del segnale ricevuto.

Essendo i segnali a tre frequenze diverse (gli integrali dei prodotti in croce sono nulli), la potenza media totale si ottiene semplicemente sommando le potenze medie dei singoli segnali. Passando dai dBm ai mW ed eseguendo la somma si ottiene 11.226 nW e passando di nuovo ai dBm, si ha infine per la potenza media: $P_{CHPW} = -49.5$ dBm. Se si confronta con il valore $P_{mi} = -50.76$ dBm ottenuta dal calcolo con gli impulsi del paragrafo precedente (§4.4.1), si vede che questi differiscono di un po' meno di 1.3 dB (circa il 35%). Questa differenza è da imputare alla maggiore incertezza del valore della potenza media calcolato usando gli impulsi²⁰. Assumeremo dunque come valore più affidabile quello ottenuto con la tecnica del Channel Power e scriveremo per la potenza media $P_m = -49.5$ dBm. Da questa utilizzando la relazione (2) si ottiene il valor medio del campo elettrico -17.698 dBV/m, ovvero $E_m = 0.130$ V/m.

5 - Analisi dei risultati

I risultati delle misure effettuate sul radar di Firenze-Peretola dalla postazione di misura presso il nostro laboratorio all'IFAC sono riportati nella Tab. 1 e nella Tab. 2.

La Tab. 1 presenta le caratteristiche del radar utili per le elaborazioni di interesse protezionistico.

Tab. 1 – Risultati delle misure sulle caratteristiche del radar ATCR di Firenze-Peretola (Firenze)

	Misurato
Frequenza di lavoro	$f_1 = 2.7348$ GHz $f_2 = 2.8152$ GHz $f_3 = 2.8552$ GHz
Lunghezza 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

La Tab. 2 riassume i risultati delle misure, ovvero il valore del campo elettrico di picco e quello medio E_{medio} . Di quest'ultimo si è riportato sia il valore con il radar operativo ("antenna rotante") sia, per completezza, quello ad antenna ferma.

²⁰ Questo perché la procedura di misura in modalità Channel Power passa attraverso l'integrazione su alcune centinaia di punti e questa operazione media gli errori. Il calcolo attraverso la misura degli impulsi, oltre all'incertezza dell'altezza degli impulsi, che può essere modesta, fa ricorso all'approssimazione del diagramma di radiazione con un fascio di intensità uniforme e ampiezza T_i che può avere scostamenti dal valore qui assunto a seconda dell'esatta forma del lobo di radiazione principale e dal peso dei lobi secondari.

Tab. 2 - 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

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

Si noti che se prendiamo i valori misurati, di picco e medio, e ne facciamo il rapporto si ottiene 48.5 (33.7dB), cioè una quantità superiore a 32 (30dB) oltre il quale è il valore di picco ad essere più vicino al limite che non il valore medio. Quindi anche in un radar con un elevato duty cycle (-10 dB, il più elevato dei radar su cui ci è capitato di fare misure) quale è questo di Firenze-Peretola, il rapporto fra valore di picco e valor medio è superiore a 32.

5.1 - Riferimenti normativi

L'esposizione della popolazione civile ai campi elettromagnetici è regolata in Italia dal DPCM 8 luglio 2003. Detto DPCM, secondo quanto affermato all'art 1 (Campo di applicazione), si applica agli impianti fissi per telecomunicazione²¹ e non ai campi prodotti da impianti radar²², per i quali quel DPCM rimanda ad un successivo decreto, che a tutt'oggi non esiste. Per fortuna, il comma 4²³ del succitato decreto suggerisce la possibilità di utilizzare la Raccomandazione Europea del 12 luglio 1994, la quale, insieme all'ICNIRP5, prescrive per i campi pulsati di adottare un valore limite 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. In sintesi i limiti per i campi pulsati sono definiti 30 dB sopra i valori medi.

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'ICNIRP5 e nella Raccomandazione UE del 12/07/1994, mentre 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 completo²⁴ 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

²¹ 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

²² 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.

²³ 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".

²⁴ Si noti nel caso che si faccia questa scelta, anche il valore medio dovrebbe salire a 61 V/m invece dei 6 V/m

DPCM 8 luglio 2003, e per il valore di picco, del quale il DPCM non fa menzione, adotta il razionale 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 alle frequenze del radar (2.8 GHz).

	<i>E</i> medio (V/m)	<i>E</i> 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⁽²³⁾.

6 - Conclusioni

Abbiamo visto come affrontare la misura di segnali con struttura abbastanza complessa (sequenze di impulsi corti e lunghi che modulano tre frequenze diverse) emessi da un radar moderno come quello installato presso l'aeroporto "Amerigo Vespucci" di Firenze-Peretola.

La procedura da noi attuata è basata principalmente sull'uso di uno Spettro Analizzatore (SA) e di un'antenna calibrata, adatta per la frequenza di lavoro del radar. La strumentazione è integrata da un diodo rivelatore e un oscilloscopio per la visualizzazione della sequenza di impulsi a prescindere dalle frequenze portanti. Per applicare la procedura è comunque necessario conoscere il fattore d'antenna (AFC) e il fattore di attenuazione del cavo che collega all'antenna. Se queste quantità non sono note a priori, la misura di queste quantità richiede, comunque, l'uso dello SA.

Sono stati misurati:

- Le tre frequenze di lavoro del radar, che sono risultate centrate intorno a 2.8 GHz ($f_1 = 2.7344$ GHz, $f_2 = 2.8152$ GHz, $f_3 = 2.8552$ GHz). la loro conoscenza è necessaria per scegliere i limiti di sicurezza, l'AFC e l'attenuazione del cavo, che, come noto, sono dipendenti dalla frequenza;
- L'intensità e la durata degli impulsi;
- La frequenza di ripetizione degli impulsi;
- Il tempo di rotazione dell'antenna;
- La durata dell'esposizione a seguito valutata rilevando il diagramma di radiazione dell'antenna con il set-up diodo rivelatore-oscilloscopio;
- La potenza media, valutata sia con il calcolo dalle sequenze di impulsi sia con la misura con lo spettro analizzatore in modalità Channel Power.

Da questi dati possono essere ricavate le quantità (intensità di picco 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.

Il confronto dei valori misurati del valore di picco e del valor medio del campo elettrico con i limiti di esposizione mostrano che questi sono rispettati.

Ricordiamo infine, anche se l'osservazione può sembrare ovvia e banale, che la forma del segnale radar (gruppi di impulsi veloci ed intensi, distanziati fra loro da intervalli di secondi) 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.

Appendice

Tab. 4 - Caratteristiche tecniche nominali di un radar tipo ATCR 33 S

Tipo di radar: Radar di avvicinamento all'aeroporto	mod. ATCR-33S (Selex-SI)	
Banda tipica di lavoro	2.7 ÷ 2.9 GHz	
Forma del segnale: 2 impulsi su frequenze portanti diverse		
Durata impulsi	10 μ s	100 μ s
Frequenza di ripetizione	750 Hz	
Antenna a riflettore, mod. G-33		
Dimensione orizzontale antenna	5.50 m	
Forma fascio orizzontale	a matita	
Ampiezza a -3dB	1.45 gradi	
Dimensione verticale antenna	3.15 m	
Forma fascio verticale	Cosec ²	
Ampiezza a -3dB	5 gradi	
Guadagno	34 dBi	
Velocità di rotazione	10, 12, 15 rpm	

Calibrazione del diodo hp 8473C. L'uso tipico del diodo nella misura della potenza di segnali a RF prevede che questo venga fatto lavorare a piccola escursione (piccola potenza) del segnale RF, nel qual caso la tensione in uscita è proporzionale alla potenza che incide sul diodo. Si dice che in questo caso il diodo funziona in *legge quadratica*²⁵ e, come regola del pollice, si dice che siamo in questa condizione quando la tensione rettificata è inferiore a 20 mV. Se questo non accade, bisogna *calibrare il diodo*, ovvero stabilire la relazione fra potenza in ingresso e tensione rivelata V .

La Fig. 26 mostra la strumentazione utilizzata per calibrare il diodo. Un generatore sintetizzato (Wiltron 68169, 10 MHz – 40 GHz) produce un segnale sinusoidale di cui possono essere impostate e variate la frequenza e la potenza.

Nella Tab. 5 sono riportati i valori della tensione V_{osc} rettificata dal diodo e misurata all'ingresso dell'oscilloscopio al variare del valore della potenza. La frequenza è impostata su 2.8 GHz, una frequenza intermedia fra le tre su cui opera il radar di Firenze-Peretola. Le misure sono state ripetute anche ad altre frequenze (500 MHz, 1 GHz e 5 GHz) senza scostamenti significativi da quelli ottenuti a 2.8 GHz.

²⁵ Siamo in legge quadratica quando la tensione di uscita V è in relazione lineare con la potenza che incide sul diodo. Sembra un bisticcio di parole. In realtà, il nome "legge quadratica" deriva dal fatto che la potenza è proporzionale al *quadrato* della tensione o della corrente RF.

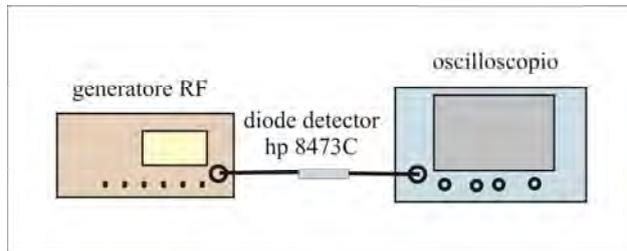


Fig. 26 - Set-up per la calibrazione del rivelatore a diodo

P(dBm)	P(mW)	V_{osc} (mV)
-22.3	0.00589	3.87
-19.3	0.01175	7.7
-17.3	0.01862	12.34
-16.3	0.02344	15
-15.3	0.02951	18.59
-14.3	0.03715	22.5
-13.3	0.04677	26.87
-12.3	0.05888	32.50
-11.3	0.07413	38.75
-10.3	0.09333	46.25
-9.3	0.11749	55.63
-8.3	0.14791	65.62
-7.3	0.18621	75
-6.3	0.23442	89.06
-5.3	0.29512	104.7
-4.3	0.37154	121.9

Tab. 5 - Tensione V_{osc} , in mV) all'ingresso dell'oscilloscopio al variare della potenza RF(in dBm o in mW) alla frequenza di 2,8 GHz.

Riferimenti bibliografici

1. S. Gelli: "Radar di avvistamento e sistemi di tracking", <http://infocom.uniroma1.it/~robseu/Radar%20e%20navigazione%20aerea/Seminario%202/seminario%20AMS%202.pdf>
2. "Spectrum Analysis, Pulsed RF", Agilent, Application Note N. 150-2
3. 423B, 8470B, 8472B, 8473B/C, Low Barrier Schottky Diode Detectors, Agilent Data Sheet, November 2002;
4. 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*.
5. 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.
6. 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).