

Misure di campo elettrico in prossimità di impianti radar HF per il rilevamento delle correnti marine

Barellini A.¹, Bracci B.¹, Licitra G.², Silvi A.M.¹, Zari A.¹

¹Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana – Area Vasta Costa – Settore Agenti Fisici – via Marradi, 114 – Livorno

²Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana – Area Vasta Costa – via Marradi, 114 – Livorno

Riassunto

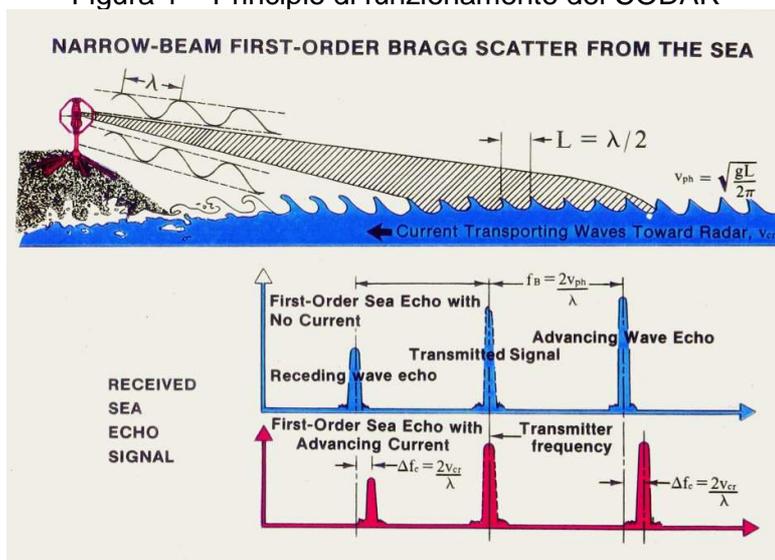
Nel corso del 2015 la Regione Toscana ha installato due radar per il rilevamento delle correnti marine (CODAR) presso l'Accademia Navale di Livorno ed il porto turistico del Comune di S.Vincenzo. In questo lavoro viene presentato un confronto tra i risultati ottenuti utilizzando diverse tecniche di misura del campo elettrico prodotto da tali impianti nelle aree immediatamente circostanti ed i risultati ottenuti. Le misure sono state effettuate sia con strumentazione a banda larga che con strumentazione a banda stretta applicando, al segnale CODAR, metodiche presenti nell'aggiornamento della Norma CEI 211-7/B in fase di pubblicazione; le diverse modalità di misura hanno prodotto risultati in buon accordo tra loro, in particolare per le misure eseguite in banda stretta.

INTRODUZIONE

L'utilizzo di sorgenti pulsate a radiofrequenza in ambito civile sta divenendo sempre più diffuso. Dall'iniziale impiego dei radar per la difesa aerea in ambito militare ed il controllo del traffico aereo in ambito civile, negli ultimi anni i settori di utilizzo soprattutto in campo civile sono diventati molteplici: radar meteorologici e radar per il rilevamento della velocità solo per citarne alcuni.

A partire dagli anni 80, l'utilizzo di sorgenti radar ha trovato applicazione anche per lo studio delle correnti marine. Tale tipologia di sorgenti viene indicata con il termine di CODAR (Coastal Ocean Dynamics Applications Radar) ed utilizza per la trasmissione la banda di frequenze HF (3-30 MHz). Il segnale trasmesso dai CODAR, tipicamente a polarizzazione verticale, si propaga sulla "ruvida" superficie conduttrice del mare che costituisce a sua volta una sorgente diffrattiva. I segnali radar ritornano alla loro sorgente solo nel caso in cui il segnale radar incontri un'onda la cui lunghezza è pari a metà della lunghezza d'onda del segnale trasmesso e l'onda stia viaggiando lungo un percorso radiale, avvicinandosi o allontanandosi dal radar (Bragg scattering) (Barrick, 1977). La corrente marina determina uno spostamento in frequenza del segnale, dovuto all'effetto Doppler, che si va ad aggiungere a quello determinato dalla velocità delle onde marine (fig. 1), permettendone così la rilevazione.

Figura 1 – Principio di funzionamento del CODAR



Nel corso del 2015 la Regione Toscana ha provveduto all'installazione di due radar per il rilevamento delle correnti marine presso l'Accademia Navale di Livorno e presso il porto turistico del Comune di S.Vincenzo. La Regione Toscana si è rivolta ad ARPAT quale suo organo tecnico per la valutazione dei livelli di campo elettromagnetico prodotti da tali sorgenti.

In questo lavoro viene presentata l'attività di misura dei livelli di campo elettrico effettuata in prossimità dei due impianti.

GLI IMPIANTI CODAR

Entrambi gli impianti CODAR installati sono costituiti da antenne a monopolo operanti nella banda attorno ai 13 MHz. La figura 2 riporta un prospetto architettonico dell'antenna utilizzata mentre in tabella 1 sono riassunti i principali parametri radioelettrici dell'impianto.

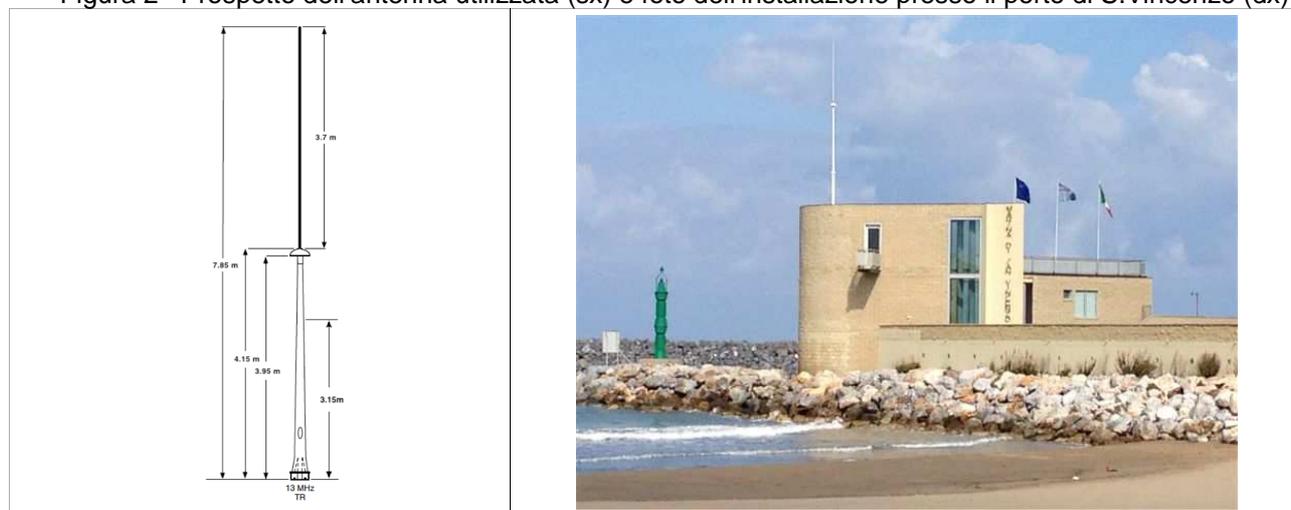
Tabella 1 – Principali dati radioelettrici degli impianti CODAR

Numero portanti emesse	1
Modulazione	Pulsed frequency swept CW
Banda di trasmissione (MHz)	13,45÷13,55
Frequenza di ripetizione FMCW	2 Hz
Potenza di picco (W)	80
Periodo ripetizione impulso (ms)	≈ 1000
Durata impulso (ms)	≈ 500
Potenza media (W)	≈ 40
Guadagno antenna (dBi)	8
Tilt (°)	0

Il segnale trasmesso consiste di una portante modulata in frequenza (FMCW) nell'intervallo tra 13,45 MHz e 13,55 MHz, con spazzata in frequenza eseguita con periodo di ripetizione di 2 Hz. La modulazione della portante viene effettuata in maniera pulsata con una durata dell'impulso t di circa 500 ms ed un periodo di ripetizione T_R dell'impulso di circa 1 ms (duty cycle ≈ 50%). La fig. 3 riassume lo schema di trasmissione del segnale.

L'impianto installato presso l'Accademia Navale di Livorno è stato collocato sulla scogliera a pochi metri di distanza dal mare mentre quello presso il porto turistico del Comune di S.Vincenzo è stato installato sulla sommità dell'edificio portuale (fig. 2).

Figura 2 –Prospetto dell'antenna utilizzata (sx) e foto dell'installazione presso il porto di S.Vincenzo (dx)



STRUMENTAZIONE E METODI

Le misure di campo elettrico sono state eseguite sia con una catena di misura in banda stretta costituita da un analizzatore di spettro Agilent ESA-E E4402B (9kHz-3 GHz) ed una sonda di campo elettrico CLAMPCO Sistemi mod. FP2000 sia con una catena in banda larga costituita da un misuratore PMM 8053 collegato ad una sonda di campo elettrico PMM mod. EP330 tramite ripetitore ottico PMM mod. OR02.

Le misure effettuate con strumentazione a banda larga (valori RMS su 6 minuti) avevano lo scopo di effettuare uno screening delle aree circostanti gli impianti. In alcuni punti sono state effettuate misure anche con strumentazione a banda stretta allo scopo di confrontare i risultati con quelli ottenuti con misuratore in banda larga. Non essendo nota a priori, ciò ha consentito la verifica della risposta a tale tipo tipologia di segnale pulsato da parte della sonda a banda larga utilizzata.

Per quanto attiene la misura in banda stretta, l'Appendice B "Misura e valutazione del campo elettromagnetico emesso dai radar di potenza" della norma CEI 211-7, in fase di aggiornamento, non dettaglia i parametri da impostare nell'analizzatore nel caso specifico di sorgente radar di tipo Pulsed-FMCW come quella CODAR. Le misure in banda stretta sono state effettuate in diverse modalità che verranno dettagliate nel seguito.

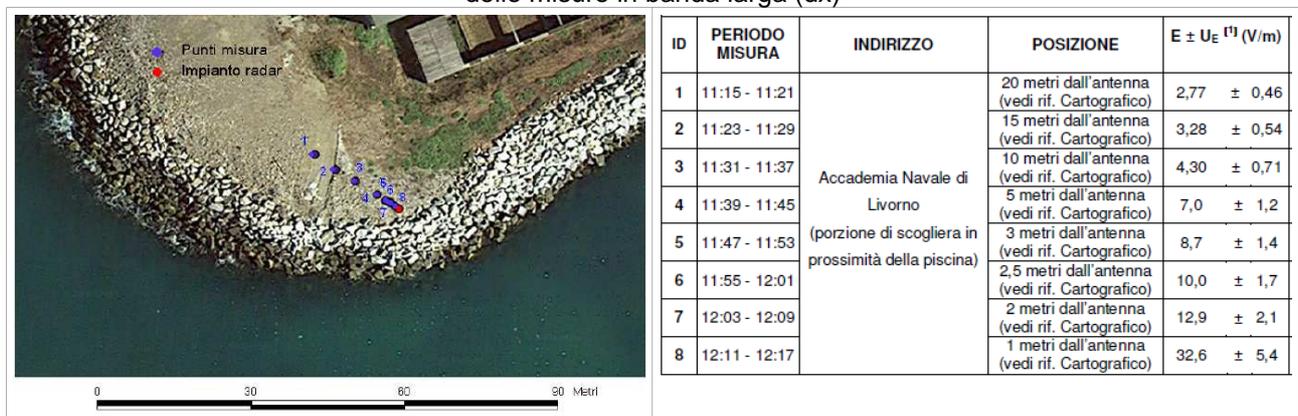
RISULTATI

I risultati delle misure eseguite con strumentazione a banda larga presso il sito dell'Accademia Navale di Livorno sono riportati in Figura 3. Le misure sono state effettuate in punti posti lungo un raggio uscente dall'antenna a distanze comprese tra 1 e 20 m dalla stessa, con un valore massimo di campo compresi tra 32,6 V/m a 1 m dalla sorgente e 2,77 V/m a 20 m da essa.

Il DPCM 8 luglio 2003, all'art. 1 comma 3, stabilisce che i limiti e le modalità di applicazione del decreto per gli impianti radar e per gli impianti che per la loro tipologia di funzionamento determinano esposizioni pulsate, saranno fissati con successivo DPCM, ad oggi non ancora pubblicato. Pertanto, il limite di esposizione di 20 V/m e il valore di attenzione e l'obiettivo di qualità di 6 V/m previsti dal DPCM 8 luglio 2003 non possono essere applicati a questa tipologia di sorgente. I valori misurati allo stato attuale devono pertanto essere confrontati con le restrizioni previste dalla Raccomandazione del Consiglio della Comunità Europea n. 519 del 12/07/1999. In particolare tale Raccomandazione prevede per gli impianti operanti nella banda di frequenza 10÷400 MHz, in cui ricadono anche gli impianti CODAR oggetto di misura, un valore del livello di riferimento per il campo elettrico pari a 28 V/m, inteso come valore RMS. Parallelamente, per le sorgenti pulsate, la stessa Raccomandazione indica un valore di 896 V/m come valore di campo elettrico di picco da non superare.

Le misure in banda stretta sono state eseguite in tre punti (punti ID nn. 1, 4 e 5 di fig. 3). In ciascun punto le misure sono state eseguite in tre diverse modalità.

Figura 3 – cartina con indicazione dei punti di misura del sito presso l'Accademia Navale (sx) e risultati delle misure in banda larga (dx)



In fig. 4 è mostrato lo spettro del segnale CODAR. Lo spettro occupa una banda di 100 kHz pari all'intervallo di frequenza di 13,45÷13,55 MHz entro cui viene modulata la portante. Una prima misura in banda stretta è stata effettuata pertanto impostando sull'analizzatore di spettro una Resolution Bandwidth (RBW=300 kHz) maggiore della larghezza di banda occupata dal segnale CODAR, il detector PEAK e la modalità MAX HOLD. L'analizzatore è stato impostato con la frequenza centrale (13,5 MHz) pari al centro banda del segnale CODAR ed una larghezza di banda analizzata (SPAN) pari a 1 MHz. Con questa metodica si ottiene il valore di campo elettrico di picco E_P ovvero il valore del campo elettrico del segnale CODAR durante la durata dell'impulso t . Il valore del campo elettrico viene ottenuto tramite la nota relazione che lega il valore di potenza P (in dBm) letto sull'analizzatore al valore di campo elettrico E (V/m) corrispondente:

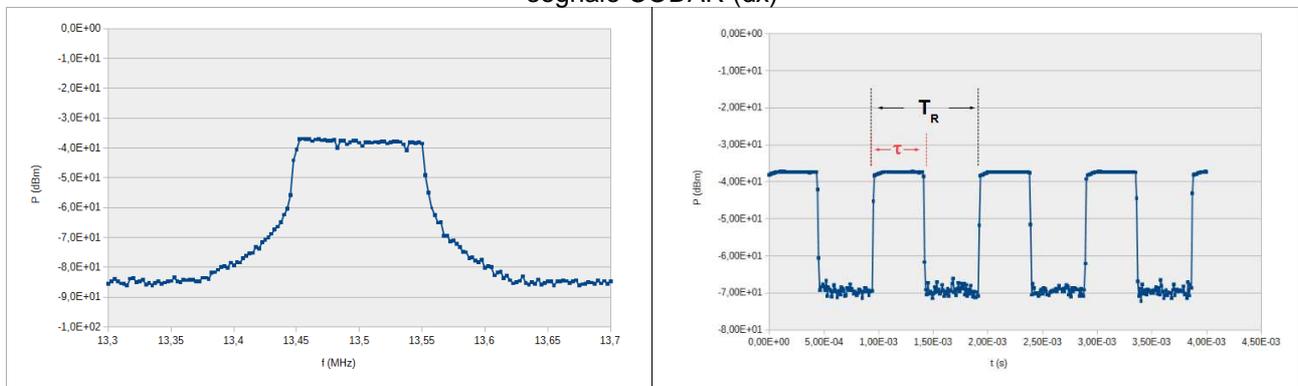
$$E = 10^{(P+AF+CA-13,01)/20}$$

dove AF e CA sono rispettivamente i valori di fattore d'antenna e di attenuazione del cavo. Essendo la sonda utilizzata monoassiale, la misura viene ripetuta sui 3 assi della sonda ed il valore di campo elettrico totale viene ottenuto tramite la formula:

$$E_T = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

Una seconda misura è stata effettuata utilizzando l'analizzatore nel dominio del tempo, selezionando la modalità SPAN ZERO. Anche in questo caso, l'analizzatore è stato impostato con la frequenza centrale pari alla frequenza di centro banda del segnale CODAR, una RBW pari a 300 kHz e detector in modalità PEAK. Il tempo di sweep è stato posto pari a 4 ms ed è stata acquisita una sola traccia (SINGLE SWEEP).

Figura 4 – spettro in frequenza del segnale CODAR (sx) e andamento nel tempo della potenza del segnale CODAR (dx)



La fig. 4 (destra) mostra un esempio dell'andamento nel tempo della potenza del segnale CODAR ricevuta sull'analizzatore ottenuto tramite questa modalità di misura che consente altresì la misura del tempo di accensione t , risultato pari a 445 ± 5 ns, e del periodo di ripetizione T_R dell'impulso, pari a 975 ± 5 ns. Il duty cycle risulta pertanto pari al 45,6%.

Potendo misurare il duty cycle d dell'impulso, questa metodica consente pertanto di ottenere non soltanto il valore del campo elettrico di picco E_P (ottenuto a partire dal valore di potenza letto sull'analizzatore durante l'accensione dell'impulso) ma anche il valore mediato sul periodo di ripetizione dell'impulso E_M tramite la formula:

$$E_M = E_P * \sqrt{d}$$

Tabella 2 – Risultati misure in banda stretta presso il sito dell'Accademia Navale e confronto con le misure in banda larga

Punto di misura	Metodo di misura	E _P (V/m)	E _M (V/m)
1	Dominio della frequenza	3,87	2,61*
	Dominio del tempo	3,72	2,51*
	Channel Power		2,36
	Banda larga		2,77
4	Dominio della frequenza	9,4	6,4*
	Dominio del tempo	9,3	6,3*
	Channel Power		6,1
	Banda larga		7,0
5	Dominio della frequenza	10,8	7,3*
	Dominio del tempo	10,2	6,9*
	Channel Power		6,7
	Banda larga		8,7

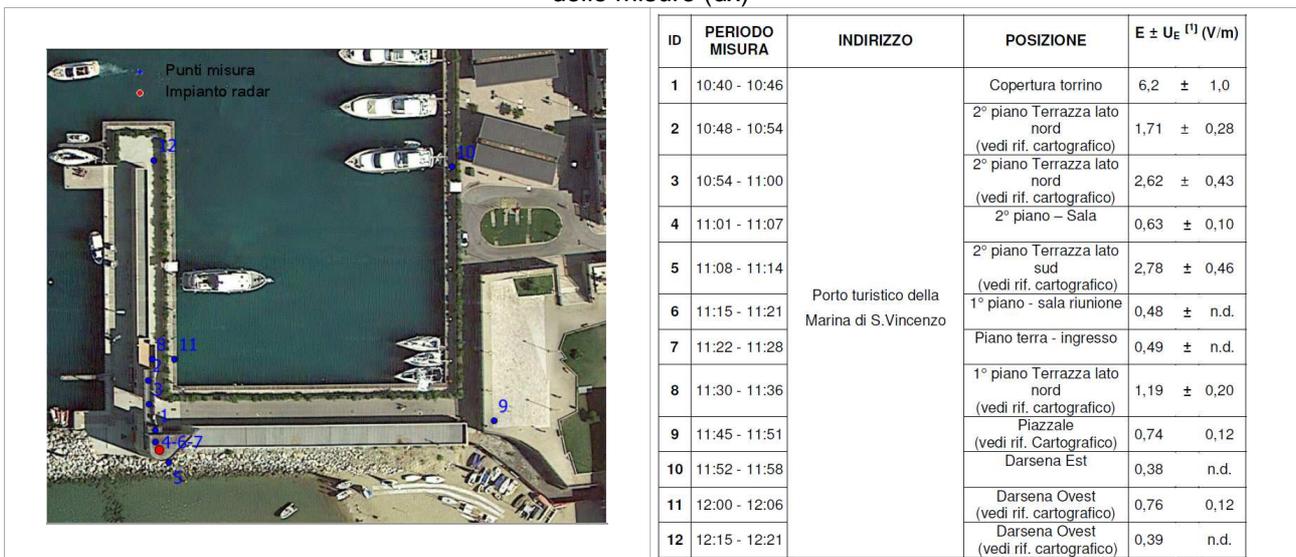
* valori ricavati da E_P tramite il valore del duty cycle (45,6%)

In ultimo, è stata effettuata una misura in modalità Channel Power, tramite la quale l'analizzatore esegue un integrale dello spettro acquisito secondo la seguente formula (Agilent, 2012):

$$CP(dBm) = 10 * \log \left(\frac{B_s}{NBW} \left(\frac{1}{N} \sum_1^N 10^{\frac{P_i}{10}} \right) \right)$$

dove P_i è il valore di potenza (in dBm) associato a ciascun pixel contenuto all'interno della banda di frequenza di integrazione B_s, NBW è la noise bandwidth dell'analizzatore di spettro, proporzionale al valore del filtro RBW e N, numero di pixel contenuti nella banda di integrazione.

Figura 5 – cartina con indicazione dei punti di misura del sito presso l'Accademia Navale (sx) e risultati delle misure (dx)



La traccia su cui viene effettuato il calcolo è il risultato delle medie in potenza di 100 tracce acquisite. Tramite questa modalità di misura si ottiene direttamente il valore di campo elettrico medio sul periodo di ripetizione dell'impulso (Bini, 2010). Confrontando i valori ottenuti per il valore medio E_M , la tab. 2 mostra un buon accordo tra le misure in banda larga e quelle in banda stretta con una sovrastima delle prime (20-30% rispetto alle misure eseguite in modalità Channel Power). I risultati mostrano inoltre un buonissimo accordo tra le tre metodiche in banda stretta utilizzate. Sempre confrontando i valori ottenuti per il valore medio E_M , le differenze sono contenute entro il 10% con il valore massimo chiaramente ottenuto con la misura nel dominio della frequenza che utilizza la modalità MAX HOLD per l'acquisizione della traccia.

I risultati delle misure eseguite con strumentazione a banda larga presso il sito del porto turistico di S.Vincenzo sono riportati in Figura 5. Nel punto ID n. 3 è stata eseguita la misura di campo elettrico anche con strumentazione in banda stretta, sempre nelle tre modalità sopra descritte. I risultati confermano quanto ottenuto presso l'altro sito con differenze dei valori ottenuti tramite le tre metodiche di misura in banda stretta compresi in questo caso entro il 15%.

Tabella 3 – Risultati misure in banda stretta presso il porto turistico di S.Vincenzo e confronto con le misure in banda larga

Punto di misura	Metodo di misura	E_P (V/m)	E_M (V/m)
3	Dominio della frequenza	3,77	2,61*
	Dominio del tempo	3,63	2,51*
	Channel Power		2,28
	Banda larga		2,62

* valori ricavati da E_P tramite il valore del duty cycle (45,6%)

CONCLUSIONI

Sono state eseguite misure di campo elettrico sia con strumentazione a banda larga che con strumentazione in banda stretta presso due impianti CODAR della Regione Toscana. Le misure in banda stretta sono state eseguite in tre differenti modalità che riprendono le metodiche contenute nell'aggiornamento della norma CEI 211-7/B in fase di pubblicazione: nel dominio della frequenza e nel dominio del tempo, che consentono di ottenere il valore del campo elettrico di picco E_P , e in modalità Channel Power che consente di ottenere il campo elettrico medio E_M sul periodo di ripetizione dell'impulso. Le misure hanno permesso di caratterizzare i livelli di campo elettrico generati da tale tipologia di sorgente e di confrontare i risultati ottenuti con le diverse catene strumentali e metodiche utilizzate. Confrontando i valori ottenuti per il valore medio E_M , i risultati mostrano un buon accordo tra le misure in banda larga e quelle in banda stretta con una sovrastima delle prime (20-30% rispetto alle misure eseguite in modalità Channel Power). Sempre confrontando i valori ottenuti per il valore medio E_M , i risultati ottenuti con le misure in banda stretta mostrano un buonissimo accordo tra le tre metodiche utilizzate che risultano contenute entro il 10-15% a dimostrazione della sostanziale equivalenza tra esse.

BIBLIOGRAFIA

- Agilent, *Spectrum and Signal Analyzer Measurements and Noise*, Application note 5966-4008E, 2012
- Barrick D.E, Evans M.W., Weber B.L., *Ocean surface currents mapped by radar*, Science, Vol.198, pp.138-144, 1977
- CEI, Norma CEI 211-7, *Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10kHz-300 GHz con riferimento all'esposizione umana*, 2001
- CEI, Norma CEI 211-7/B, *Misura e valutazione del campo elettromagnetico emesso dai radar di potenza*, 2008 (in fase di aggiornamento)
- Raccomandazione del Consiglio della Comunità Europea 1999/519/CE del 12/07/1999, *Raccomandazione del Consiglio relativa alla limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300*, G.U.C.E. L199 del 30/07/1999
- Bini M., Ignesti A, Riminesi C, *Procedura per la misura di campi e.m. emessi da impianti Radar utilizzabile in campagne di Sorveglianza Fisica Ambientale*, Rapporto CNR-IFAC-TR-08/009, 2010