

Risposta di sensori di campo nella misura di segnali radio digitali a banda larga

Trincherò D.¹, Fiorelli B.¹, Galardini A.¹, Longobardi F.¹, Stefanelli R.¹,
Anglesio L.², Benedetto A.², Trincherò S.², d'Amore G.²,
Borsoero M.³, Vizio G.³

1 iXem Labs, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Torino
info@iXem.polito.it

2 ARPA Piemonte, Centro Regionale per le Radiazioni Ionizzanti e Non Ionizzanti, Ivrea
s.trincherò@arpa.piemonte.it

3 INRIM, Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Torino
m.borsoero@inrim.it

Questo lavoro analizza il comportamento dei più comuni sensori a larga banda utilizzati per la misura del campo elettromagnetico, in ambito protezionistico, in presenza di segnali radio digitali a banda larga, quali ad esempio Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), utilizzato nell'accesso radio a banda larga (Wi-Max, Hiperlan), e nella televisione digitale (DVB-x), Direct Secret Spread Spectrum (DSSS), utilizzato nel Wi-Fi, e Wideband Code Division Multiple Access (W-CDMA), utilizzato nella telefonia cellulare di terza generazione (UMTS).

Le prove sono state effettuate in ambiente controllato (camera anecoica) presso il laboratorio di antenne e compatibilità elettromagnetica del Politecnico di Torino e presso la divisione "Elettromagnetismo" dell'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM, Torino). ARPA Piemonte ha messo a disposizione sensori di diverse tipologie, normalmente utilizzati per i sopralluoghi in campo, nell'ambito delle azioni di controllo.

Il comportamento dei sensori è stato messo in relazione con misure di precisione effettuate per mezzo di un bolometro e di un analizzatore di spettro vettoriale.

I risultati del lavoro forniscono importanti suggerimenti per la definizione di procedure specifiche durante la fase di calibrazione e caratterizzazione dei sensori, che dipendono necessariamente dalla tipologia del segnale oggetto di misura.

INTRODUZIONE

La misura del campo elettromagnetico a radiofrequenza a fini protezionistici si effettua storicamente utilizzando le tecniche tipiche della Compatibilità Elettromagnetica Irradiata, le cui procedure definiscono come scopo della misura la valutazione della distribuzione di "rumore" per unità di banda, dove il rumore può essere interpretato come una somma di diversi contributi monocromatici e incoerenti [1-3]. Per questo motivo i segnali modulati in analogico, fino a pochi anni fa gli unici utilizzati nelle comunicazioni a radiofrequenza, sono sempre stati misurati, oltre che con analizzatori di spettro, mediante sonde di campo, in grado di rilevare il campo complessivo su una banda prefissata [4]. Nel caso in cui più segnali siano simultaneamente presenti, le sonde rappresentano il modo più semplice per misurare il campo elettromagnetico totale, poiché la somma di tutti i contributi viene calcolata analogicamente grazie ad un diodo che funge da rivelatore di inviluppo [5] o viene acquisita fisicamente, grazie a rivelatori di temperatura o bolometrici. Alternativamente l'analizzatore di spettro offre la possibilità di misurare il reale valore del campo elettromagnetico associato ad ogni segnale, effettuando stime ancor più precise, soprattutto se lo strumento è provvisto di un demodulatore di segnale.

Precedenti lavori hanno dimostrato che i sensori di campo, in presenza di segnali digitali a larga banda, non offrono un'adeguata affidabilità [6]. Questa tipologia di segnali, oggi sempre più utilizzata, è caratterizzata da un'elevata dinamica, una repentina variabilità temporale e un'ampia occupazione spettrale, tutti fattori che producono un'incertezza nella stima del campo elettrico misurato dai sensori. Per questo motivo si è deciso di intraprendere un'attività sperimentale atta a caratterizzare il comportamento dei più comuni misuratori di campo e valutare l'accuratezza della misura. I risultati sono disponibili in letteratura [7] e vengono qui sintetizzati per un'immediata consultazione.

CONFIGURAZIONE SPERIMENTALE

La risposta di diversi sensori a banda larga è stata valutata in ambiente controllato, generando segnali riferibili e misurandoli in camera anecoica. Il setup sperimentale, basato su una proposta disponibile in letteratura [8] prevede l'utilizzo di un generatore di segnali vettoriale (Agilent Technologies E4438C), la cui uscita è stata amplificata di 40 dB per mezzo di un amplificatore di potenza lineare. Utilizzando accoppiatori direzionali, il segnale generato è stato monitorato con un analizzatore di spettro vettoriale (Agilent

Technologies PSA E4440A). Il segnale è stato quindi trasmesso con cavi per radiofrequenza all'antenna posizionata in camera anecoica; onda incidente e riflessa sono state monitorate per mezzo di un secondo accoppiatore direzionale collegato ad un misuratore di potenza a radiofrequenza bicanale. Come antenna trasmittente è stata utilizzata un'antenna a tromba con guadagno standard. Un diagramma a blocchi della configurazione sperimentale è mostrato in Fig.1.

I test sono stati effettuati presso due camere anecoiche. Una è localizzata presso il Laboratorio di Antenne e Compatibilità Elettromagnetica (LACE) del Politecnico di Torino (Fig. 2). L'altra presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM) di Torino (Fig. 3). La prima di esse è una camera completamente anecoica, schermata con materiale assorbente (piramidi di 20 cm di altezza) con un volume utile di circa 4m x 2m x 2m. In questa camera è possibile generare campi elettrici fino a 30 V/m nell'intervallo di frequenze compreso tra 900 MHz e 3 GHz. La camera dell'INRIM è anch'essa completamente anecoica ma con piramidi di 1m circa di altezza. Il volume utile è 8m x 4m x 4m e vi si possono generare campi elettrici fino a 35 V/m nell'intervallo di frequenze compreso tra 450 MHz e 4 GHz.

Anche se nelle stesse condizioni il campo elettrico può essere calcolato a partire dal guadagno dell'antenna trasmittente [9], per lo scopo di questo studio le misure sono state confrontate con quelle eseguite posizionando nella zona di quiete un'antenna di guadagno noto, collegata ad un analizzatore di spettro e ad un analizzatore vettoriale per segnali digitali. I valori misurati sono stati assunti a riferimento e confrontati con quelli forniti in lettura da diversi sensori a banda larga posizionati nello stesso punto.

L'incertezza associata alle misure di campo elettrico è dovuta a diversi contributi: la sorgente RF, l'amplificatore RF, i disadattamenti di impedenza, il posizionamento dell'antenna e della sonda, il guadagno dell'antenna di riferimento. Dall'analisi di questi contributi l'incertezza relativa della configurazione sperimentale è stata stimata al 12% (2σ) per frequenze al di sopra di 1 GHz.

Figura 1 - Diagramma a blocchi del banco sperimentale utilizzato per valutare le prestazioni delle sonde

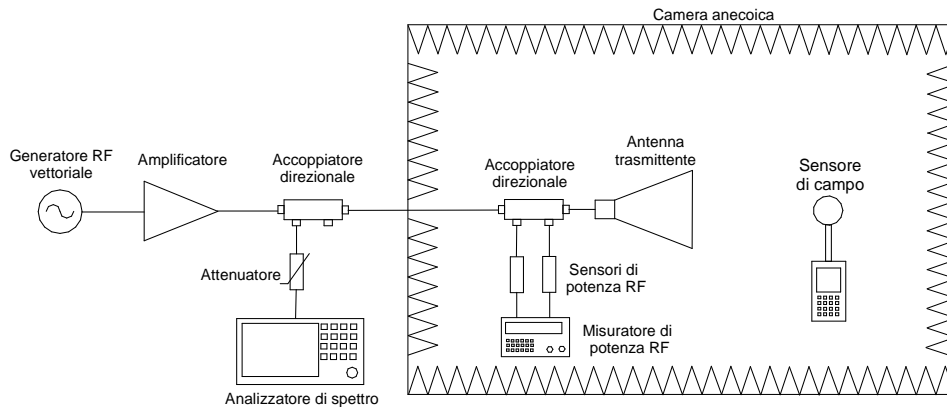


Figura 2 – Camera Anecoica LACE

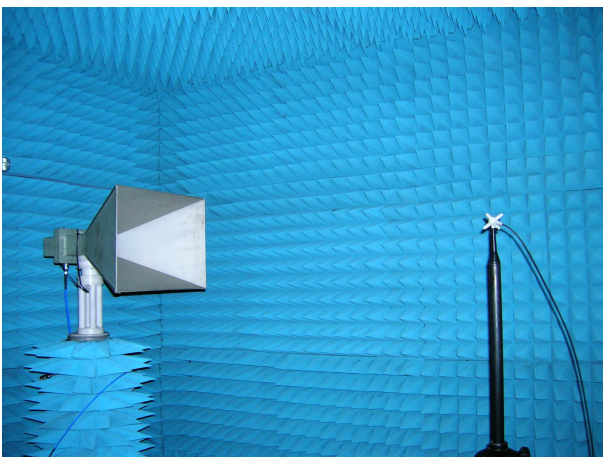
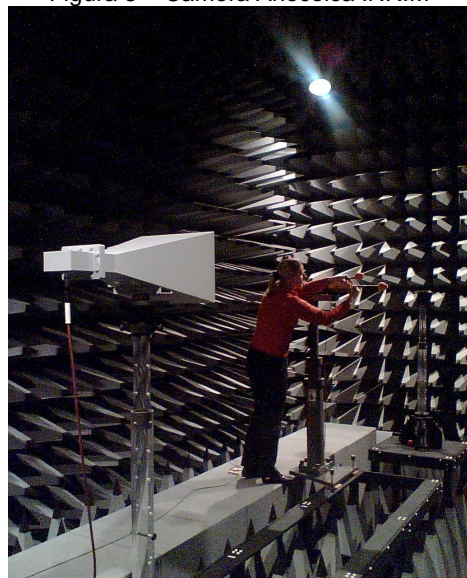


Figura 3 – Camera Anecoica INRIM



RISULTATI DELLE MISURAZIONI

I sensori di campo vengono spesso tarati in presenza di segnali non modulati. Per questo motivo, è lecito aspettarsi un margine di incertezza additivo quando lo strumento viene utilizzato per misurare segnali modulati digitalmente; per evidenziare l'incertezza dovuta all'utilizzo di sonde tarate in assenza di modulazione, è stato applicato un metodo di analisi comparativa. La sonda è stata prima esposta a campo elettromagnetico non modulato e poi a campo elettromagnetico modulato con tecniche digitali (OFDM, DSSS, W-CDMA), mantenendo costante la frequenza della portante e la potenza media trasmessa. Il riferimento di potenza veniva fornito dalla lettura del bolometro [10].

Sono stati selezionati diversi sensori commerciali, le cui caratteristiche principali sono raccolte in Tab.1: tipo di rilevatore, banda di funzionamento, intervallo dinamico. Ogni sensore è stato esposto a campo elettromagnetico generato variando la potenza di segnale da -30 a 0 dBm, a intervalli di 3 dB. Per mantenere una certa uniformità di risposta, è stata fissata una frequenza di lavoro pari a 2.5 GHz, che permetteva di utilizzare tutti i sensori all'interno della loro banda di frequenza nominale.

Si sono misurate le seguenti tipologie di segnale:

- S1. UMTS, test model 1 con 64 portanti, FDD, larghezza di banda 3.84 MHz, modulazione W-CDMA;
- S2. Wi-Fi IEEE 802.11b, TDD, larghezza di banda 10 MHz, modulazione DSSS;
- S3. Wi-Max IEEE 802.16e, FDD, larghezza di banda 20 MHz, modulazione OFDM.

Ogni misura è stata riferita a quella ottenuta esponendo il sensore ad un segnale CW. I risultati sono evidenziati nella Fig. 4 (W-CDMA), Fig. 5 (DSSS), Fig. 6 (OFDM). Nelle figure è rappresentato il rapporto in dB tra il campo misurato in presenza del segnale modulato e il campo misurato in presenza del segnale non modulato (ovviamente a potenza costante).

Dall'analisi dei dati sperimentali appare evidente come tutti i sensori misurino una sovrastima del campo elettrico in presenza di un segnale digitale, che cresce all'aumentare della potenza trasmessa. Mentre per alcuni sensori la sovrastima è contenuta entro 0.3 dB, per altri può arrivare oltre i 3dB, in particolare per livelli di campo misurati superiori a 25 V/m.

Per chiarezza occorre specificare che in questo lavoro sono stati considerati solo segnali con frame "pieni". Uno specifico approfondimento volto a studiare il comportamento dei sensori in presenza di segnali impulsati è in corso di svolgimento.

Tabella 1 – Caratteristiche dei sensori analizzati

Sensore	Numero di diodi	Larghezza di banda [MHz]	Intervallo dinamico [V/m]
A.1	3	0.1 – 9250	0.15 – 90
A.2	3	0.1 - 3000	0.3 - 300
A.3	3	0.1 - 3000	0.3 - 300
A.4	3	1.0 - 18000	0.8 - 800
A.5	3	1.0 - 40000	0.8 - 800
A.6	9	0.3 – 3800	0.15 – 300
A.7	1	0.1 - 3000	0.5 - 100
A.8	3	0.1 – 3000	0.50 – 800
A.9	3	3.0 – 18000	0.80 – 1000
A.10	3	10 – 60000	0.80 – 300
A.11	3	0.8 - 40000	1 - 300
A.12	3	0.1 - 5000	0.5 - 800
A.13	3	0.1 - 3000	0.5 - 300

Figura 4 - Risultati rapporto E_{mod}/E_{cw} in presenza di modulazione W-CDMA

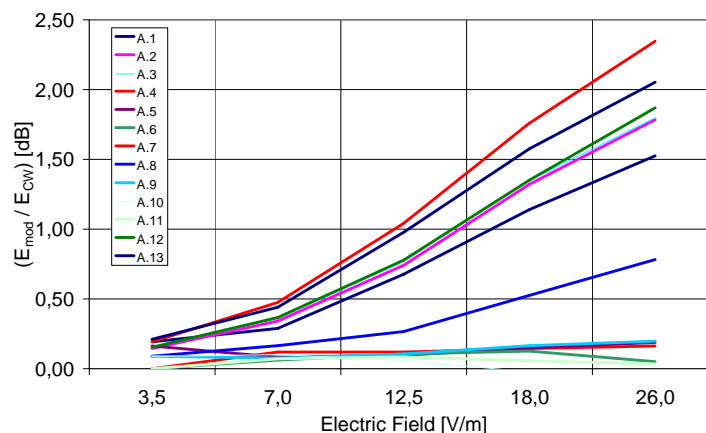


Figura 5 - Risultati rapporto Emod/Ecw in presenza di modulazione DSSS

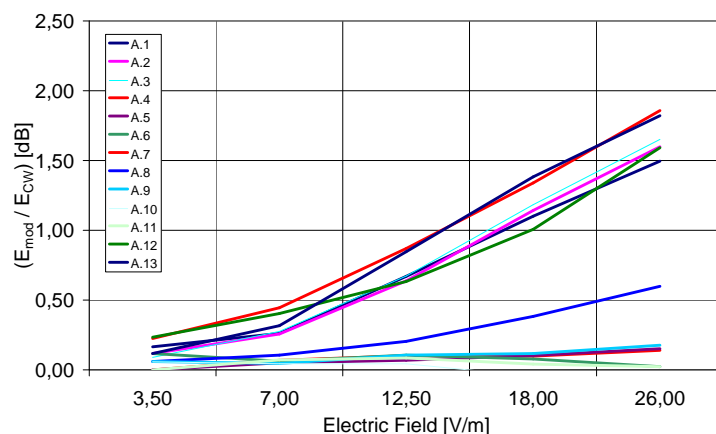
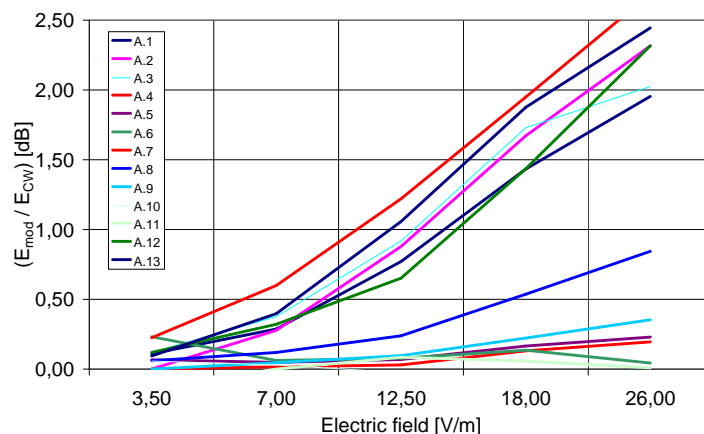


Figura 6 - Risultati rapporto Emod/Ecw in presenza di modulazione OFDM



RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano Agilent Technologies per la fornitura di strumentazione e supporto tecnico e Narda STS per aver fornito alcuni dei sensori utilizzati nelle prove sperimentali.

Bibliografia

- [1] Clayton R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, New York, Wiley, 1992.
- [2] M. Kanda, E.B. Larsen, M. Borsero, P.G. Galliano, I. Yokoshima, N.S. Nahman, "Standards for electromagnetic field measurements", *Proceedings of the IEEE*, Volume 74, Issue 1, Jan. 1986 pp. 120 – 128.
- [3] M. Kanda, "Standard probes for electromagnetic field measurements", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Volume 41, Issue 10, Oct. 1993 pp. 1349 – 1364.
- [4] "IEEE Recommended Practice for the Measurement of Potentially Hazardous Electromagnetic Fields—RF and Microwave", IEEE Standard C95.3-1991, IEEE, U.S.A., 1991
- [5] K. Abramski, H. Trzaska, "FM EMF sensors", *2002 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 21-24 May 2002 pp. 222 – 225.
- [6] S.Trincherò, A. Benedetto, L. Anglesio, G. d'Amore, D. Trincherò, "Exposure Measuring Techniques for Wide Band Mobile Radiocommunications", *Radiation Protection Dosimetry*, Volume 111, n. 4, pp.429-433, 2004.
- [7] D. Trincherò, F. Longobardi, B. Fiorelli, R. Stefanelli, L. Anglesio, A. Benedetto, S. Trincherò, G. D'amore, M. Borsero, G. Vizio, "Measurement of Spread-Spectrum Radio Signals by Means of Wideband Field Probes" *20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, 12-16 January 2009.
- [8] D. Trincherò, F. Longobardi, A. Galardini, B. Fiorelli, R. Stefanelli, L. Anglesio, A. Benedetto, S. Trincherò, G. D'amore, M. Borsero, G. Vizio, "Experimental Set-up for the Characterisation of Field Probes Performance in Presence of Digitally Modulated Radio Signals", *Antennas and Wireless Propagation Letters*, IEEE, Accepted for future publication, 13 January 2009.
- [9] "IEEE Standard Test Procedures for Antennas", IEEE Standard 149-1979, IEEE, U.S.A., 1979.
- [10] D. Trincherò, B. Fiorelli, R. Stefanelli, L. Anglesio, A. Benedetto, S. Trincherò, G. D'amore, M. Borsero, G. Vizio, "Electromagnetic Field Measurement In Presence Of Radiofrequency Wideband Digital Signals", *2008 URSI General Assembly*, Chicago, Illinois, USA, 7-16 August 2008