

Valutazione teorica e sperimentale dell'esposizione in presenza di reti radio digitali di nuova generazione

Daniele Trincherò

iXem Labs, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Torino
Daniele.Trincherò@polito.it

memoria invitata

Riassunto

Le reti radio digitali (genericamente individuate con il termine inglese "wireless") sono sempre più presenti nelle attività quotidiane. Esistono standard per ogni tipo di comunicazione, limitata al corpo umano come nel caso dei sensori per monitoraggio medico, a quelle su scala regionale o addirittura nazionale. In ogni applicazione, queste reti sono generalmente caratterizzate dall'utilizzo di modulazioni digitali molto efficienti in termini di banda e resistenza al canale radio, caratteristiche che ne hanno permesso una rapida diffusione. Inoltre la potenza impegnata non è particolarmente rilevante, e quindi la localizzazione degli impianti ricade nelle vicinanze o all'interno degli ambienti di vita. In ambito protezionistico, è pertanto necessario utilizzare tecniche di simulazione valide nelle immediate vicinanze dell'installazione, e soprattutto adattare le tecniche di misura a segnali caratterizzati da modulazioni complesse. Questa memoria presenta una rassegna delle principali tecniche di simulazione e misura disponibili in letteratura, e pertanto adattabili alle esigenze delle principali tipologie di rete digitale.

INTRODUZIONE

Il decennio 2000-2010 ha definitivamente consacrato l'avvento del digitale, inteso come l'insieme delle tecniche di telecomunicazione basate sulla codifica numerica dell'informazione. La digitalizzazione della "parola" permette l'introduzione di processi di ottimizzazione del canale, che prevedono la compressione, l'irrobustimento e la protezione del dato e che si traducono in un decisivo miglioramento della risorsa trasmissiva. All'iniziale digitalizzazione dell'informazione, si è recentemente aggiunto un utilizzo intensivo di tecniche di allargamento dello spettro, che permettono un'ulteriore ottimizzazione della risorsa di frequenza, con importanti ricadute su tutte le comunicazioni basate su trasmissione radio. Per questo motivo, è facile prevedere che nel prossimo futuro la trasmissione radio analogica o radio digitale a banda stretta venga limitata ad un numero sempre minore di applicazioni, per lasciare sempre più spazio alle reti radio digitali a banda larga.

Le reti radio digitali a banda larga possono essere raggruppate in tre categorie principali: reti per broadcasting radiofonico o radiotelevisivo, reti per telefonia mobile, reti per accesso utente. Poiché i servizi di comunicazione, così come le esigenze degli utenti, prevedono la fornitura di contenuti sempre più complementari e sovrapposti, la distinzione tende a diventare sempre meno marcata. Di conseguenza, gli standard trasmissivi si evolvono velocemente verso piattaforme sempre più integrate: è facile prevedere una progressiva convergenza delle tre categorie verso un'unica architettura applicabile per molteplici utilizzi. Tralasciando a successivi approfondimenti l'analisi degli standard radio di prossima generazione, questa memoria si concentra sulle più recenti reti radio digitali a banda larga implementate per ognuna delle tre categorie sopracitate.

RETI RADIODIGITALI A BANDA LARGA PER BROADCASTING

Gli standard utilizzati in Italia, per il broadcasting televisivo e radiofonico, a titolo operativo o sperimentale, sono tre: il sistema DVB-X (Digital Video Broadcasting), con le sue varianti DVB-S (satellitare), DVB-C (su cavo), DVB-T (terrestre), DVB-H (mobile); il sistema DAB-X (Digital Audio Broadcasting), con varianti analoghe a quelle del DVB-X; il sistema DRM (Digital Radio Mondiale). Tutti i sistemi citati utilizzano una modulazione a banda larga di tipo OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing).

La potenza utilizzata è generalmente inferiore a quella che caratterizza i rispettivi servizi analogici. Un recente studio ha evidenziato come il valore medio dell'esposizione sia abbattuto di circa il 35% [1] Tuttavia l'esigenza di mantenere condizioni di copertura a livello regionale, fa sì che la potenza utilizzata sia comunque elevata, e che procedure per il monitoraggio dell'esposizione debbano comunque essere considerate.

RETI RADIODIGITALI A BANDA LARGA PER TELEFONIA MOBILE

Lo standard utilizzato in Italia è UMTS (Universal Mobile Transmission System), che appartiene alla terza generazione dei sistemi di telefonia cellulare. Utenti diversi, "agganciati" alla stessa stazione radiobase UMTS, utilizzano un solo canale, senza ripartizione di tempo, grazie all'utilizzo di un sistema di codifica dell'informazione code division multiple access, CDMA) ortogonale ed indipendente, che permette di individuare univocamente mittente e/o destinatario della comunicazione, offrendo ai singoli una ripartizione della banda di canale in modo differenziato, a seconda delle necessità.

La potenza utilizzata è tipicamente inferiore rispetto ai sistemi di telefonia di prima e seconda generazione. Un recente studio ha evidenziato come il valore medio dell'esposizione sia abbattuto di circa il 25% [2]. Tuttavia, la presenza di Stazioni Radio Base (SRB) a ridosso dei luoghi abitati richiede anche in questo caso l'adozione di opportune misure per la valutazione dell'esposizione.

RETI RADIODIGITALI A BANDA LARGA PER ACCESSO UTENTE

Gli standard sono molteplici, a seconda della destinazione d'uso della rete.

- Reti WBAN (Wireless Body Area Networks): disciplinate dallo standard IEEE 802.15.6, sono destinate al collegamento di dispositivi all'interno del corpo umano.
- Reti WPAN (Wireless Personal Area Network): disciplinate dagli standard appartenenti alla categoria IEEE 802.15 (ad eccezione dell'IEEE 802.15.6), sono destinate al collegamento di dispositivi indossati dall'uomo o localizzati nelle immediate vicinanze dell'utente. I sistemi di trasmissione i più importanti sono il Bluetooth (standard IEEE 802.15.1.1a), l'UltraWideBand (standard IEEE 802.15.3a) e lo ZigBee (standard IEEE 802.15.4).
- Reti WLAN (Wireless Local Area Networks): disciplinate dagli standard appartenenti alla categoria IEEE 802.11, sono destinate al collegamento di dispositivi in ambienti confinati (indoor). I dispositivi ricetrasmittenti vengono genericamente indicati con l'acronimo Wi-Fi (Wireless Fidelity); un consorzio internazionale, la Wi-Fi Alliance, disciplina le procedure di certificazione degli apparati immessi sul mercato, in modo tale da garantire il rispetto dello standard IEEE di riferimento e l'interoperabilità con apparati costruiti da terzi. Il documento originale dello standard, denominato IEEE 802.11-1997, prevedeva velocità di trasmissione pari a 1 e 2Mb/s, su supporto radio e anche su infrarosso. La versione del 2007, denominata IEEE 802.11-2007, sintetizza tutte le pubblicazioni precedenti, prevedendo velocità di trasmissione fino a 54 Mb/s. Nel 2008 questo limite è stato superato dallo standard IEEE 802.11n.
- Reti WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks): disciplinate dagli standard appartenenti alla categoria IEEE 802.16, sono destinate al collegamento di dispositivi in ambienti metropolitani, con copertura radioelettrica paragonabile o poco superiore a quella delle reti per telefonia mobile. Sono generalmente indicate con l'acronimo Wi-Max (Worldwide Interoperability for Microwave Access). L'Unione Europea prevede anche l'utilizzo di sistemi a standard HIPERLAN Type 2 (denominato anche HIPERMAN), standard dell'ETSI basato su tecnologia analoga a quella delle WLAN (IEEE 802.11-2007), attualmente largamente utilizzati in Italia per fornitura di connettività a banda larga nelle aree in cui i collegamenti via cavo non offrono adeguate prestazioni.
- RETI WRAN (Wireless Regional Area Networks): disciplinate dagli standard appartenenti alla categoria IEEE 802.22, saranno destinate al collegamento di dispositivi su scala regionale, con copertura radioelettrica paragonabile a quella delle reti per broadcasting televisivo. Lo standard è attualmente in corso di elaborazione, non è ancora utilizzato sul territorio italiano. A breve è prevista l'apertura di alcuni servizi sperimentali a cura del laboratorio iXem del Dipartimento di Elettronica del Politecnico di Torino.
- RETI WWAN. (Wireless Wide Area Networks): si tratta di collegamenti di tipo punto-punto fortemente diretti destinati a realizzare connessioni MultiKiloMetriche (MKM), basati su tecnologia di tipo WMAN e caratterizzati dall'utilizzo di trasmettitori a bassa potenza e ricevitori ad altissima sensibilità. Trovano applicazione nei paesi in via di sviluppo per la realizzazione di

dorsali di comunicazione, in assenza di infrastrutture di rete alternative. Nel 2007 gli iXem Labs hanno messo in pratica una sperimentazione per dimostrare l'applicabilità e la sostenibilità di sistemi MKM, realizzando connessioni fino a 300 km. In Italia esistono alcune reti puramente sperimentali, realizzate e gestite dai radioamatori del CISAR, e la rete montana sperimentale degli iXem Labs.

Tutti i sistemi citati utilizzano tecniche di trasmissione radio a banda larga, per lo più basate su OFDM. Il DSSS è utilizzato da ZigBee e dalle versioni meno recenti di IEEE 802.11, mentre l'FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) è utilizzato dal Bluetooth e dalle versioni obsolete di IEEE 802.11.

Per quanto riguarda la potenza impegnata, quasi tutti i sistemi elencati, con l'eccezione delle WMAN e delle WRAN, utilizzano frequenze non licenziate, e per questo motivo sono sottoposti ad una fortissima limitazione nella potenza irradiata EIRP (Effective Isotropic Radiated Power). Questa limitazione in generale non pone problemi di esposizione. Tuttavia i trasmettitori destinati ad un utilizzo personale o domestico, per quanto limitati in potenza, vengono normalmente localizzati a ridosso del corpo umano o degli ambienti di vita, rendendo comunque necessarie azioni di monitoraggio o caratterizzazione preventiva.

VALUTAZIONE TEORICA DELL'ESPOSIZIONE

Le tecniche destinate storicamente alla valutazione numerica del campo elettromagnetico generato da sistemi di radiocomunicazione sono efficaci anche in presenza di segnali radio digitali, limitatamente al rispettivo raggio di applicazione. Tutti gli approcci basati su modelli raggistici, da quelli semplificati (campo libero e Fresnel), a quelli più evoluti che contemplano l'utilizzo di algoritmi di ray tracing e della teoria geometrica della diffrazione, possono essere correttamente utilizzati, se il punto di osservazione cade all'interno della regione di Fraunhofer del radiatore. È stato recentemente dimostrato che questa condizione non è sempre rispettata, sia in presenza di stazioni radio base UMTS e WiMax, e a maggior ragione in presenza di dispositivi domestici o portatili [3]. Per questo motivo, è necessario utilizzare modelli di propagazione che garantiscano affidabilità ma soprattutto sovrastima, almeno all'interno della regione di Fresnel.

L'approccio più rigoroso consiste nell'utilizzo di metodi full-wave: il metodo dei momenti (Method of Moments – MoM) [4] o le differenze finite nel dominio del tempo (Finite Difference Time Domain – FDTD) [5]. Sfortunatamente questi metodi sono difficilmente applicabili, in quanto richiedono un eccessivo onere computazionale e necessitano di dati progettuali non sempre accessibili.

La letteratura propone approcci ibridi, basati su un utilizzo combinato di metodi full-wave [6] o ottici[7], che hanno il pregio di aumentare notevolmente l'efficienza computazionale.

Due metodi recenti appaiono come particolarmente efficienti, dal punto di vista della simulazione finalizzata a valutazioni protezionistiche. Il primo è il cosiddetto modello cilindrico, spesso individuato come "metodo Faraone", la cui descrizione analitica è pubblicata in [8] e [9], e per il quale sono state anche svolte campagne di validazione sperimentale [10]. Il secondo è un metodo basato su approssimazioni alla Fraunhofer, corrette e modificate in modo tale da garantirne la validità anche in regione di Fresnel. È di recentissima pubblicazione [11] e viene individuato come "metodo Trincherò". La semplicità computazionale, l'immediatezza implementativa e la possibilità di effettuare calcoli basati esclusivamente sulla conoscenza dei parametri radioelettrici standard, rendono questo ultimo metodo ottimale per valutazioni protezionistiche nelle immediate vicinanze dell'antenna.

VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELL'ESPOSIZIONE

Una recente pubblicazione [12] ha evidenziato come gli strumenti a banda larga possano produrre letture errate in presenza di segnali digitali ad ampio spettro. L'errore è dovuto al limitato range dinamico del rivelatore a diodo, che non emerge durante le normali procedure di calibrazione basate sull'utilizzo di segnali non modulati (Continuous Wave - CW). In particolare, è stato dimostrato che in presenza di segnali quasi impulsati, tipici delle reti digitali in condizioni di traffico limitato o assente, si possono ottenere sottostime significative. Per questo motivo, l'utilizzo di strumenti a banda larga dovrebbe essere condizionato ad una pre-caratterizzazione accurata, con verifiche delle prestazioni e degli errori in presenza di segnali digitali.

Se la pre-caratterizzazione evidenzia errori, ma garantisce la fornitura di un risultato comunque conservativo, i sensori a banda larga possono essere utilizzati per campagne di pre-monitoraggio, per verifiche preliminari e in generale per la caratterizzazione di siti con livello di esposizione contenuto entro i limiti normativi. Ogni qualvolta, per tramite di uno strumento di misura in banda larga, si dovesse riscontrare un valore di campo elettromagnetico prossimo o superiore al limite, è necessario un approfondimento a banda stretta per verificare l'attendibilità della misura.

Per quanto riguarda la misura a banda stretta, i fondamenti della misura sono quelli delle Guide 211-7 e 211-10 [13], [14] che forniscono raccomandazioni utili per la caratterizzazione, simulazione e misura di una completa casistica di sistemi utilizzati nelle radiocomunicazioni. Tuttavia, all'atto di stesura di quelle Guide i sistemi di radiocomunicazione digitale a larga banda erano limitati alle applicazioni personali e in ambienti chiusi (indoor), pertanto sono necessarie alcune integrazioni.

La misura a banda stretta di segnali modulati numericamente con tecniche di allargamento dello spettro, anche quando l'operatore dispone di strumentazione di alto livello, è insidiosa e può dar luogo a errori molteplici. Le dinamiche in gioco sono notevoli, la distribuzione cumulativa delle ampiezze impegnate tocca un massimo di 13 dB – 15 dB, il frame trasmesso può non avere durata costante e in ogni caso viene suddiviso in una successione pseudo-casuale di bursts, tali da essere assimilabili, in condizioni di basso carico della rete, ad un segnale quasi impulsato. Per questo motivo è sempre opportuno effettuare le misurazioni con strumenti dedicati, in grado di compiere un'analisi della modulazione, e verificare l'effettiva potenza impegnata, allo scopo di minimizzare la condizione di errore.

Lo strumento più indicato per effettuare misure è il ricevitore numerico vettoriale. Si tratta di un normale ricevitore, o analizzatore di spettro, nel quale la parte numerica che segue il front-end è sostituita, o meglio, accoppiata, ad un demodulatore numerico in grado di rilevare le caratteristiche di modulazione specifiche. Mediante tale strumento è possibile valutare in modo esatto la potenza di segnale, analizzare la costellazione (operazione di scarso interesse compatibilistico, ma fondamentale per la caratterizzazione del canale radio), analizzare la durata del frame e la periodicità dei burst attivi. Inoltre è possibile caratterizzare la dinamica del segnale.

La conoscenza di questi dati permette di misurare direttamente la potenza di segnale, che rappresenta anche la stima di massimo, cioè la potenza (e quindi il campo elettromagnetico) che verrebbe trasmessa (irradiato) dal trasmettitore se il frame in downlink occupasse tutta la risorsa temporale. Inoltre è possibile estrapolare da quella lettura il campo medio dovuto al solo trasmettitore, confrontando la durata dei burst trasmessi in downlink con la durata complessiva del frame.

Ovviamente, data la complessità e non predicibilità del segnale, è sempre consigliabile effettuare misure con strumentazione adeguata e di buon livello, anche quando la misura è "solamente" finalizzata alla caratterizzazione dell'esposizione. In particolare, l'analisi della modulazione può fornire indicazioni importanti relative alla validità della misura e alle incertezze in gioco. Inoltre, note le caratteristiche di modulazione, è possibile estrapolare in modo semplice ed immediato i coefficienti di carico relativi all'emissione massima e media.

Tuttavia l'utilizzo di analizzatori di segnali vettoriali presenta alcune controindicazioni. In primo luogo si tratta di strumenti costosi. Inoltre richiedono un'esperienza d'uso complementare rispetto al bagaglio culturale di chi effettua misure compatibilistiche di tipo tradizionale. Infine gli strumenti per analisi vettoriale sono destinati ad un utilizzo in laboratorio, dovrebbero essere trasportati con estrema attenzione e pertanto non sono molto indicati per le applicazioni in campo. L'alternativa consiste nell'utilizzo di strumenti tradizionali, accompagnando alla misura un processo matematico di estrapolazione, ad esempio quello discusso nella pubblicazione [15].

Bibliografia

- [1] D. Trincherò, F. Longobardi, F. Cresci, R. Garino, P. Parenti, "La transizione da televisione analogica a digitale: ricadute sull'esposizione della popolazione", *Quarto Convegno Nazionale Controllo ambientale degli agenti fisici: nuove prospettive e problematiche emergenti*, Vercelli, 24-27 marzo 2009.
- [2] F. Longobardi, M. R. Leo, F. Cresci, D. Trincherò, "Analisi statistica comparata dell'esposizione al campo elettromagnetico generato da stazioni radio base di seconda e terza generazione", *Quarto Convegno Nazionale Controllo ambientale degli agenti fisici: nuove prospettive e problematiche emergenti*, Vercelli, 24-27 marzo 2009.

- [3] S. Blanch, J. Romeu, and A. Cardama, "Near-field in the vicinity of wireless base-station antennas: An exposure compliance approach," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 50, pp. 685–692, May 2002.
- [4] C.A. Balanis, *Advanced engineering electromagnetics*. Arizona State University, John & Sons, 1989, Section 12.
- [5] A. Taflove, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. Norwood, MA, Artech House, 1995
- [6] P. Bernardi, M. Caragnaro, S. Pisa, and E. Piuze, "Human exposure to radio base-station antennas in urban environment," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 48, pp. 1996–2002, Nov. 2000.
- [7] G. Lazzi and O. P. Gandhi, "A mixed FDTD-integral equation approach for on-site safety assessment in complex electromagnetic environments," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 48, pp. 1830–1836, Dec. 2000.
- [8] A. Faraone, R.Y.-S. Tay, K.H. Joyner, and Q. Balzano, "Estimation of the average power density in the vicinity of cellular base-station collinear array antenna," *IEEE Transaction VT*, Vol. 49, No. 3, May 2000.
- [9] R. Cicchetti and A. Faraone, "Estimation of the peak power density in the vicinity of cellular and radio base station antennas," *IEEE Trans EMC*, Vol. 46, No. 2, May 2004.
- [10] T. Kobayashi and T. Nojima, "Estimation of electric field intensity in the Fresnel region of collinear array antennas," *IEICE, Trans. Communication*. Vol. E77-B, No. 6, Jun 1994.
- [11] D. Trincherò, A. Galardini, R. Stefanelli, B. Fiorelli, P. Gianola, R. Scotti, R. Vallauri, "A Fraunhofer-based Approach for the Assessment of the Field Radiated in the Fresnel Region of an Antenna", in pubblicazione on *IEEE Antennas, Wireless and Propagation Letters*, Vol. 9, 2009.
- [12] D. Trincherò, R. Stefanelli, F. Longobardi, A. Galardini, B. Fiorelli, L. Anglesio, A. Benedetto, G. D'Amore, S. Trincherò, M. Borsero, G. Vizio, "Experimental Set-up for the Characterisation of Field Probes Performance in Presence of Digitally Modulated Radio Signals", *IEEE Antennas, Wireless and Propagation Letters*, 2009, ISSN: 1536-1225
- [13] Norma It. CEI 211-7 "Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10 kHz - 300 GHz, con riferimento all'esposizione umana", Fascicolo 6456 - Anno 2002
- [14] Norma It. CEI 211-10 "Guida alla realizzazione di una Stazione Radio Base per rispettare i limiti di esposizione ai campi elettromagnetici in alta frequenza", Fascicolo 5909 - Anno 2001
- [15] D. Trincherò, B. Fiorelli, A. Galardini, F. Longobardi, R. Stefanelli, L. Anglesio, A. Benedetto, S. Trincherò, G. D'Amore, M. Borsero, G. Vizio, "Misura dell'esposizione a segnali radio digitali a banda larga mediante strumenti selettivi in frequenza", *Quarto Convegno Nazionale Controllo ambientale degli agenti fisici: nuove prospettive e problematiche emergenti*, Vercelli, 24-27 marzo 2009.