

TRASMISSIONE DIGITALE SU CANALE RADIO A BANDA LARGA. SORGENTI ESPOSITIVE E TECNICHE DI VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE

Daniele Trincherò, Benedetta Fiorelli, Riccardo Stefanelli

iXem Labs – Politecnico di Torino
Wireless anywhere, anyhow, anytime, for anybody

e-mail: info@iXem.polito.it

ABSTRACT

Wideband digital modulations are emerging as the most suitable means to enhance the capabilities of the Physical Layer in every communication system. Concerning radio transmissions, the use of these signals allows the optimisation of the spectrum, maximizing the exploitation of channel bandwidth. The implementation of spread spectrum techniques, frequency hopping modules and channel control procedures, makes critical the measurement of the signal. For this reason, most of the traditional compatibility techniques are not applicable to the measurement of an electromagnetic field digitally modulated and must be adapted by means of dedicated instruments and specific experimental procedures.

INTRODUZIONE

Il termine “Wireless” (letteralmente, “senza fili”) si contrappone al termine “Wired” (letteralmente, “cablato”) che ha assunto oggi, nel linguaggio quotidiano, in parte a ragione e in parte a torto, una connotazione quasi obsoleta. I sistemi senza fili permettono di interconnettere un grande numero di dispositivi, senza ricorrere all'utilizzo di cavi o di supporti fissi. Questi collegamenti si possono realizzare veicolando l'informazione su tre tipologie di supporto fisico, tutte appartenenti alla sfera delle applicazioni pratiche dello spettro elettromagnetico: le onde radio, l'infrarosso, i fasci laser.

I collegamenti tramite onde radio vengono utilizzati per realizzare reti finalizzate a servire scenari eterogenei con terminali non necessariamente disposti in condizioni di visibilità, eventualmente separati da veri e propri ostacoli, quali edifici, alberi, pareti. I collegamenti basati sugli infrarossi vengono utilizzati per collegare dispositivi visibili direttamente, sono lenti e con portata decisamente limitata. I collegamenti basati su fasci laser sono caratterizzati da un'elevata velocità di trasmissione e pertanto possono essere utilizzati per collegare parti di reti basate sull'utilizzo di tecnologie radio o addirittura cablate. I collegamenti realizzati mediante laser tuttavia sono molto sensibili alle condizioni meteorologiche e alle vibrazioni e per questo motivo finalizzati esclusivamente ad applicazioni in linea di vista.

I radiocollegamenti sono utilizzati da tempo per le applicazioni di radiodiffusione (broadcasting), per i collegamenti radiotelefonici, e per la realizzazione di ponti radio. L'introduzione delle modulazioni digitali, ed in particolare delle modulazioni “spread spectrum” ha consentito di razionalizzare ed ottimizzare la risorsa trasmissiva, aumentando considerevolmente la quantità di informazione a parità di banda impegnata. Per questo motivo tutti i settori delle radiotelecomunicazioni si evolvono oggi verso l'utilizzo di modulazioni digitali a banda larga. In particolare, l'introduzione di tecniche di modulazione basate su OFDM permette la realizzazione di infrastrutture di costo non elevato per accesso radio alle reti di dati (il cosiddetto ultimo miglio).

RETI PER RADIO-BROADCASTING DIGITALE

Tra gli standard proposti per il broadcasting digitale, il più largamente implementato è quello radiotelevisivo: il DVB (Digital Video Broadcasting), attuato con successo nei sistemi di distribuzione televisiva satellitare e via cavo. Il DVB-T (DVB Terrestrial) ne rappresenta la versione finalizzata alla diffusione terrestre, candidato alla sostituzione dei vecchi sistemi analogici in modulazione PAL, SECA, ecc. In questo momento l'Italia vive una fase di coesistenza analogico/digitale, all'interno di uno scenario radioelettrico non stabilmente pianificato ed omogeneizzato, conseguente alla liberalizzazione incontrollata degli anni settanta, e solo parzialmente stabilizzato a partire dagli anni novanta. Per questo motivo molti apparati DVB-T funzionano oggi con potenze elevate, superiori a quelle necessarie e ottimizzabili una volta attuata la piena conversione da analogico a digitale. Insieme con il DVB-T esiste anche lo standard DVB-H (DVB Handheld), nato per la ricezione radiotelevisiva mediante terminale portatile. La ricezione DVB-H, soprattutto in scenari complessi, richiede l'installazione di sistemi a bassa potenza, che prendono il nome di "gap filler". Si tratta di impianti normalmente collocati all'interno dell'ambiente urbano, con potenze di funzionamento tipiche delle stazioni di distribuzione per la telefonia mobile, dell'ordine della decina di Watt.

Il broadcasting radiofonico ha il suo standard digitale a banda larga, il DAB (Digital Audio Broadcasting), il primo sistema di radiocomunicazione a fare uso di modulazione OFDM (formulato a partire dal 1981). Ciononostante, la sua attuazione ha trovato da sempre grandi difficoltà implementative. Il DAB può essere implementato in Banda III (174–240 MHz) e Banda L (1452–1492 MHz), con occupazione di banda pari a 1.536 MHz. Oggi esiste lo standard DAB+, più efficiente del DAB ma non compatibile con la versione precedente. Regno Unito, Danimarca e Norvegia sono tra i paesi con la più forte penetrazione di trasmissioni DAB. La poco strutturata situazione radioelettrica italiana (l'Italia è uno dei pochissimi paesi al mondo con canalizzazione FM a 50 KHz, contro i 200 KHz della quasi totalità dei paesi Europei) rende molto complessa la transizione ad uno standard digitale, e per questo motivo l'Italia non appartiene al novero dei paesi che hanno all'attivo il maggior numero di canali DAB funzionanti. Alla RAI, tuttavia, si deve l'attuazione di sperimentazioni importanti.

Nato successivamente al DAB per soddisfare le esigenze di un numero più ristretto di operatori, il DRM (Digital Radio Mondiale) è lo standard digitale che ha sopravanzato lo stesso DAB e che si prevede venga implementato universalmente per il broadcasting in onda lunga, media e corta, in tempi più rapidi rispetto allo switch-off da FM a DAB. È basato su modulazione OFDM. La larghezza di banda può variare dai 4,5 (5) KHz ai 9 (10) KHz ai 18 (20) KHz. Si tratta ovviamente di bande di modulazione non propriamente "larghe", anche se il numero di sottoportanti, compreso tra 80 e 500, rende il DRM a tutti gli effetti una modulazione digitale a banda larga. La caratteristica essenziale del DRM è il trasporto di un solo contenuto informativo sulla stessa risorsa trasmissiva. Questa caratteristica, che dal punto di vista ingegneristico è sfavorevole perché richiede la realizzazione di un numero maggiore di sistemi trasmettenti, può rappresentare in realtà una buona opportunità in quei paesi (come l'Italia) che soffrono una complessa situazione radioelettrica. Per questo motivo, c'è chi ne ipotizza lo sfruttamento come sostitutivo del DAB in banda FM.

RETI PER ACCESSO RADIO A BANDA LARGA

Le reti radio per trasmissioni di dati sono comunemente classificate all'interno di cinque tipologie, individuate dalla dimensione della rete e dalla destinazione d'uso. Le caratteristiche di base della tipologia di rete, del suo utilizzo e conseguentemente dei parametri che ne caratterizzano il livello

fisico (frequenza di portante, occupazione spettrale, modulazione, massima potenza impegnabile) sono normate da standard pubblicati dall'IEEE e dall'ETSI.

- Reti **WBAN** (Wireless Body Area Networks); si tratta di collegamenti destinati alla comunicazione tra dispositivi indossati da un unico individuo, e con portata limitata alle dimensioni fisiche dello stesso individuo. Sono normati dai documenti IEEE 802.15, limitatamente al task 6 (IEEE 802.15.6).
- Reti **WPAN** (Wireless Personal Area Networks); si tratta di collegamenti destinati ad uso personale, normati dai documenti IEEE 802.15, dal task 1 al 5; tra questi 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); si tratta di collegamenti di tipo punto-multipunto o punto-punto destinati ad applicazioni confinate, ad esempio per costruire reti locali all'interno di un edificio, di un'azienda o di un centro commerciale; sono normati dai documenti IEEE 802.11. 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. Lo standard IEEE 802.11n, che rappresenta l'emendamento più avanzato tra quelli già pubblicati, prevede velocità fino a qualche centinaio di Mb/s.
- Reti **WMAN** (Wireless Metro Area Networks); si tratta di collegamenti di tipo punto-multipunto destinati ad applicazioni in spazi aperti, ad esempio in alternativa al doppino nella copertura dell'ultimo miglio, oppure per portare banda larga in regioni periferiche e prive di connettività cablata. Attualmente sono disponibili due tecnologie: **HIPERLAN Type 2** (denominato anche HIPERMAN), standard dell'ETSI basato su tecnologia analoga a quella delle WLAN (IEEE 802.11-1997 e derivati) e **Wi-Max** (Worldwide Interoperability for Microwave Access), standard IEEE basato sui documenti derivati da IEEE 802.16. La particolarità più importante di WiMax consiste nel superamento di due limiti tecnologici caratteristici dei sistemi HIPERLAN: il mantenimento della connessione anche in assenza di linea di vista diretta e la possibilità di ricezione in movimento.
- Reti **WWAN** (Wireless Wide Area Networks); si tratta di collegamenti di tipo punto-punto fortemente direttivi 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 del Politecnico di Torino hanno messo in pratica una sperimentazione per dimostrare l'applicabilità e la sostenibilità di sistemi MKM, realizzando connessioni fino a 300 km [5].

I primi atti ufficiali nella standardizzazione delle tecnologie WLAN-WMAN risalgono al 1996, con la pubblicazione del documento dell'ETSI ETS 300 652 e al 1997, con la pubblicazione del documento dell'IEEE IEEE 802.11-1997 che, rispettivamente in Europa e negli Stati Uniti, proponevano due soluzioni per la standardizzazione di reti wireless a banda larga: HIPERLAN Type 1 e 802.11, introdotti per operare nella banda dei 5 GHz.

HIPERLAN Type 1 nasceva come trasmissione a singola portante, modulata FSK per trasmissioni a bassa velocità e GMSK per trasmissioni ad alta velocità; l'occupazione di banda era pari a 23.5 MHz, con bit rate fino a 23.5 Mb/s. 802.11-1997 nasceva come trasmissione "spread spectrum" di

tipo FHSS (per bit rate pari a 1 Mb/s) e DSSS (per bit rate pari a 2 Mb/s), modulata GFSK (nel caso di FHSS) o BPSK e QPSK (nel caso di DSSS); l'occupazione di banda era pari a 25 MHz, con bit rate massimo pari a 2 Mb/s. I sistemi descritti evidenziavano da subito una chiara insufficienza dal punto di vista delle prestazioni e venivano in poco tempo aggiornati, mediante passaggio a tecniche di modulazione più robuste ed efficienti, soprattutto dal punto di vista dell'utilizzo della risorsa spettrale. Nel 1999 IEEE pubblicava due emendamenti importanti allo standard del 1997, che aprono la strada alle applicazioni commerciali delle WLAN, soprattutto in ambiente domestico, ma non solo: i documenti IEEE 802.11a e IEEE 802.11b. Il primo di questi documenti introduceva l'utilizzo dell'OFDM come sistema multiportante, fissa la larghezza di canale a 22 MHz, utilizza modulazione di tipo BPSK per le portanti pilota combinata con QPSK, 16QAM e 64QAM per le portanti di dati, raggiunge bit rates pari a 54 Mb/s. Il secondo, pur basato su una tecnica di spreading dello spettro a singola portante di tipo DSSS, e quindi legata al documento originale del 1997, introduceva un elemento di novità fondamentale per la diffusione commerciale dei sistemi: la possibilità di lavorare nella banda compresa fra 2.4 e 2.5 GHz. La modulazione utilizzata è la CCK, mentre il bit rate del sistema IEEE 802.11b risulta decisamente inferiore a quello del sistema IEEE 802.11a, anche se di tutto rispetto, arrivando fino a 11 Mb/s. Ciò che rende la tecnologia di IEEE 802.11b appetibile e facilmente ingegnerizzabile, è la dinamica estremamente contenuta, che si traduce nella possibilità di utilizzare componenti a basso costo, proprio perché le dinamiche in gioco sono limitate. In realtà, in febbraio 2000, anche ETSI pubblicava un emendamento allo standard HIPERLAN, definito dal documento HIPERLAN Type 2, che fondamentalmente utilizza un livello fisico del tutto uniforme a quello utilizzato da IEEE 802.11a. Analogamente in Giappone veniva adottato lo standard HISWAN, ancorato ai parametri tecnici di HIPERLAN 2. I limiti principali dei sistemi descritti, soprattutto gli standard IEEE 802.11, vennero ben presto evidenziati dalla diffusione commerciale e di utilizzo degli stessi apparati. Mancavano infatti adeguate procedure per la gestione della Qualità di Servizio (QoS), dell'interoperabilità tra i punti di accesso, e soprattutto di sicurezza. Il fattore più importante, che era destinato a richiedere ulteriori aggiornamenti dello standard, era tuttavia quello legato alla capacità trasmissiva del canale, e soprattutto alla possibilità di raggiungere velocità più elevate. Per questo motivo tra il 1999 e il 2003 vedono la luce una serie di emendamenti (IEEE 802.11e, IEEE 802.11f, IEEE 802.11i) destinati a potenziare nell'ordine QoS, interoperabilità e sicurezza, con l'adozione dello standard WPA2. Un emendamento importante viene pubblicato nel 2003, quando IEEE pubblica lo standard IEEE 802.11g, che introduce l'utilizzo di una modulazione OFDM del tutto simile a quella pensata per lo standard IEEE 802.11a, ma applicata alla banda compresa tra 2.40 e 2.50 GHz.

Nel 2007 l'IEEE raccoglieva in un unico documento tutti gli emendamenti da 802.11a a 802.11j, creando lo **standard IEEE 802.11-2007** [2]. L'emendamento più recente è l'IEEE 802.11n, che permette di raggiungere velocità di trasmissione fino a qualche centinaio di Mb/s. L'emendamento è basato su tecniche di trasmissione multiportante di tipo OFDM, combinate con utilizzo di sistemi di ricetrasmisione di tipo MIMO. I sistemi di trasmissione basati sullo standard IEEE 802.11 e gli emendamenti successivi lavorano rigorosamente in modalità TDD. Esistono in commercio dispositivi che non rispettano lo standard IEEE 802.11 e che fanno uso di tecniche miste TDD/FDD. Normalmente questi sistemi sono destinati esclusivamente alla realizzazione di collegamenti punto-punto molto direttivi (WWAN).

I limiti principali dei sistemi basati sullo standard 802.11 sono legati alla robustezza della modulazione, rispetto alla possibilità di collegare fra loro punti a grande distanza, eventualmente non a vista, o in movimento. Tutte queste limitazioni non hanno permesso, fino a pochi anni fa, un utilizzo intensivo dei sistemi WLAN per applicazioni di tipo WMAN. Per ovviare a questi problemi e disporre, tra l'altro, di un sistema di autenticazione e di gestione della qualità di servizio più affidabile e riferibile, l'IEEE ha prodotto uno standard basato sull'utilizzo di OFDM,

che prende il nome di WiMax. Inizialmente lo standard nasceva per il mercato americano, anche perché l'Unione Europea aveva puntato su HIPERLAN. Successivamente anche i Paesi Europei hanno riconosciuto il WiMax come standard per la realizzazione di collegamenti radio punto – punto e punto – multipunto.

Wi-Max è stato standardizzato con documenti tecnici successivi, il più importante dei quali è l'IEEE 802.16d, noto universalmente come **IEEE 802.16-2004** o WiMax fisso [3]. Esiste un altro standard, pubblicato a fine 2005, l'IEEE 802.16e, noto universalmente come **IEEE 802.16-2005** o Wi-Max mobile o nomadico [4]. WiMax fisso è basato sull'utilizzo di una modulazione OFDM a 256 portanti, delle quali 8 sono utilizzate come portanti pilota, 192 come portanti dati, 56 non sono utilizzate, per permettere la separazione dei canali ed evitare l'utilizzo della frequenza centrale. Gli 8 canali pilota sono modulati BPSK, mentre le portanti di traffico possono essere modulate in BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM. Il sistema presenta grandi margini di flessibilità, permettendo di variare a piacere la banda del segnale, da 1.25 MHz a 20 MHz, mantenendo costante il numero di sottoportanti OFDM. Questa specificità è fondamentale per realizzare trasmissioni in condizioni interferenziali (multipath) in quanto, restringendo la banda, la durata del simbolo OFDM aumenta e la trasmissione diventa più robusta rispetto al fading (la durata del simbolo è inversamente proporzionale alla banda della sottoportante). WiMax mobile è basato su una modulazione SOFDMA con numero di portanti variabile. Il numero di portanti pilota rimane invariato rispetto al WiMax fisso. Come altri sistemi di comunicazione a banda larga WiMax può essere implementato in TDD, FDD o FDD half duplex. Ad ogni stazione-cliente collegata, la stazione di accesso assegna un intervallo di tempo (time slot) che può essere variato e dipende dalla mole di informazioni da trasmettere. Le singole stazioni-cliente comunicano con la stazione di accesso su subframe successivi, cadenzati nel tempo, che prendono il nome di burst. Burst assegnati a stazioni-cliente diverse possono utilizzare modulazioni diverse, nell'ordine: BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM.

RETI PER TELEFONIA MOBILE

La telefonia mobile, tra tutti i servizi che si appoggiano su canale radio, ha introdotto per prima l'utilizzo di modulazioni digitali, a partire dal cosiddetto standard 2G (GSM). Tuttavia, è solo con lo standard 3G (UMTS) che si è iniziato a fare uso di modulazioni digitali a banda larga. Il sistema UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) utilizza la tecnica CDMA (Code Division Multiple Access): tutti gli utenti abilitati a trasmettere, lo fanno alla stessa frequenza e nello stesso istante. La separazione tra gli utenti è ottenuta assegnando a ciascuno un "codice" (o sequenza) diverso. Le sequenze sono utilizzate per codificare in modo univoco l'informazione utente da trasmettere, in modo da poterla distinguere da quella degli altri utenti.

Il sistema di rete viene dimensionato assegnando ad ogni stazione trasmittente una potenza massima di alimentazione, che può essere variata, utente per utente, in funzione delle caratteristiche del servizio richiesto, ed in particolare del bit-rate con cui quel servizio possa essere erogato. La potenza varia anche in funzione della posizione dell'utente, rispetto alla stazione trasmittente e a quelle adiacenti. Il sistema UMTS, così come il sistema GSM, applica le funzionalità di controllo di potenza e di trasmissione discontinua, al fine di minimizzare la potenza di esercizio.

La condizione di blocco, che è quella di interesse per valutare la potenza massima di emissione da una stazione trasmittente, è determinata dal raggiungimento della massima emissione, conseguente alla saturazione del bit rate massimo erogabile, a sua volta definito in sede di progetto. In realtà, al fine di consentire il corretto funzionamento del sistema garantendo la possibilità di variare la potenza per i clienti che hanno già una connessione attiva, esistono procedure di "admission

control” che prevedono il rifiuto di nuove richieste quando si raggiunge una soglia percentuale prefissata della potenza massima disponibile.

CAMPO ELETTROMAGNETICO IRRADIATO DA APPARATI RADIO DIGITALI A BANDA LARGA

Normalmente gli apparati per radiotrasmissioni digitali non utilizzano potenze elevate. In effetti, questi sistemi offrono le stesse prestazioni offerte dai corrispondenti servizi erogati con modulazioni di tipo analogico, pur utilizzando potenze di esercizio decisamente inferiori.

Per quanto riguarda il broadcasting radiotelevisivo, si trovano impianti DVB-T che utilizzano trasmettitori con potenza fino al kiloWatt e cortine di antenne direttive con guadagno vicino ai 20 dBi. Sono impianti che hanno sostituito installazioni analogiche preesistenti, mantenendo spesso lo stesso sistema di antenna e non diminuendo troppo la potenza del trasmettitore, per fare fronte alla situazione interferenziale preesistente. I gap filler DVB-H collocati all’interno degli ambienti urbani utilizzano potenze di funzionamento dell’ordine della decina di Watt.

Il broadcasting radiofonico non si trova ad oggi in una fase implementativa sufficientemente avanzata. Le poche sperimentazioni accese non sono rappresentative, però si può affermare che sia il DAB (nei confronti delle trasmissioni in FM) che il DRM (nei confronti delle trasmissioni in AM) prevedono un notevole risparmio di potenza, a parità di prestazioni raggiunte.

L’UMTS è attualmente implementato nella banda a 2100 MHz. Gli operatori dispongono di due canali, ognuno di larghezza pari a 3,5 MHz, canalizzati a 5 MHz. Gli impianti vengono normalmente realizzati con trasmettitori da poche decine di Watt (tipicamente 20 W) per canale. I siti di trasmissione utilizzano sistemi di antenna omnidirezionali trisettoriali o quadrisettoriali con guadagno tra i 12 e i 19 dBi. Recentemente si è ipotizzata la collocazione di alcuni canali nella banda a 900 MHz, per irrobustire la propagazione e favorire la capacità di trasporto dati in ambienti urbani complessi. Esistono soluzioni UMTS a microcella, per la copertura di spazi circoscritti. In questo caso le potenze impegnate sono dell’ordine di qualche Watt.

Le reti WMAN e WWAN realizzate con sistemi licenziati trovano collocazione nella banda compresa tra 3.400 GHz e 3.600 GHz. In alcune zone del paese è previsto l’utilizzo temporaneo di una banda diversa, nell’attesa che venga liberata la banda nominale. La potenza irradiata EIRP è soggetta a limitazioni [6], anche se decisamente più elevate rispetto al caso non licenziato. Al fine dell’applicazione di tali limitazioni, i trasmettitori sono classificati in Stazioni Centrali (stazioni di distribuzione primarie), Stazioni di Ripetizione (stazioni di distribuzione secondarie), Stazioni Terminali (terminali utente). Per ogni operatore sono allocate due gamme di frequenza di estensione 2x21 MHz, in spettro accoppiato.

Stazione	Downlink	Uplink
Centrale	23 dBW/MHz	-
Ripetizione	23 dBW/MHz	20 dBW/MHz
Terminale Indoor	-	20 dBW/MHz
Terminale Outdoor	-	12 dBW/MHz

Tabella 1 *Tabella dei valori di potenza irradiata massima (EIRP) per le applicazioni WMAN e WWAN in banda licenziata. La potenza è espressa per unità di banda.*

Le reti WMAN e WWAN realizzate con sistemi non licenziati trovano collocazione, in Italia, in due bande: nella cosiddetta banda RadioLan a 2GHz (tra 2.400 GHz e 2.4835 GHz), più semplicemente individuata come banda “RadioLan”, e nella banda HiperMan (tra 5.470 GHz e

5.725 GHz), più comunemente individuata come banda “Hiperlan outdoor”. Entrambe le bande sono limitate in potenza, secondo le prescrizioni della Raccomandazione CEPT [7], Annex 3. In banda RadioLan la potenza irradiata EIRP è soggetta a limitazioni molto stringenti (20 dBm). I canali sono tredici, ma parzialmente sovrapposti. Questo fa sì che non si disponga mai di più di tre canali utilizzabili contemporaneamente. In banda HiperLan outdoor la potenza irradiata EIRP è soggetta a limitazioni stringenti (30 dBm). I canali sono undici, non sovrapposti e pertanto tutti utilizzabili contemporaneamente.

Le reti WLAN realizzate con sistemi non licenziati trovano collocazione, in Italia, in due bande: nella banda RadioLan a 2 GHz, più semplicemente individuata come banda “RadioLan” (tra 2.400 GHz e 2.4835 GHz), e nella banda RadioLan a 5 GHz (tra 5.150 GHz e 5.350 GHz), più comunemente individuata come banda “Hiperlan indoor”. Entrambe le bande sono limitate sia nella potenza irradiata totale che nella densità di potenza per unità di banda, secondo le prescrizioni della Raccomandazione CEPT [7], Annex 3. Come per le applicazioni WMAN, in banda RadioLan la potenza irradiata EIRP è soggetta a limitazioni molto stringenti (20 dBm), con tredici canali parzialmente sovrapposti. In banda HiperLan indoor è la potenza irradiata EIRP ad essere limitata (23 dBm). In questo caso la limitazione è imposta sulla EIRP massima, prescindendo pertanto dalla riduzione dovuta all’utilizzo di schemi per il controllo della potenza. I canali sono otto, non sovrapposti e pertanto tutti utilizzabili contemporaneamente.

Applicazione	Banda [GHz]	Canali	Banda [MHz]	EIRP [dBm]	EIRP [dBm/MHz]
RadioLan Indoor	2,400 – 2,4835	13	20	20	10 ^(*)
RadioLan Outdoor	2,400 – 2,4835	13	20	20	10 ^(*)
HiperLan Indoor	5,150 – 5,350	8	20	23	10
HiperLan Outdoor	5,470 – 5,725	11	20	30	17

Tabella 2 Tabella dei valori di potenza irradiata massima (EIRP) per le applicazioni WMAN, WWAN e WLAN in banda non licenziata. La limitazione (*) non si applica ai sistemi che utilizzano modulazione FHSS, ma solo DSSS e OFDM, ecc.

A titolo esemplificativo, in Figura 1, Figura 2, Figura 3 si riportano i risultati relativi alla valutazione del campo irradiato da impianti radio digitali a banda larga in un contesto urbanizzato. I risultati sono stati ottenuti mediante il software di propagazione iXem-Prop, sviluppato presso i Laboratori iXem del Politecnico di Torino. La Figura 1 mostra i risultati di simulazione del campo elettrico irradiato da una stazione radio base UMTS posizionata sul tetto dell’edificio al centro della figura, con potenza di apparato pari a 20 W e sistema di antenna tri-settoriale omnidirezionale nel piano equatoriale e guadagno pari a 15 dBi. Viste le comuni specifiche radioelettriche, la situazione espositiva può essere considerata rappresentativa delle emissioni derivanti da una stazione WiMax o da un punto di broadcasting DVB-H in ambito urbano. La Figura 2 mostra il campo irradiato da un telefono in comunicazione all’interno dello stesso edificio con massima potenza di emissione. Per semplificare il confronto, si è ipotizzato che i muri dell’edificio fossero trasparenti alla propagazione radioelettrica. La Figura 3 mostra il campo irradiato da un sistema di trasmissione RadioLan omnidirezionale con antenna trasmittente posizionata sul tetto dell’edificio stesso.

Il confronto tra le simulazioni evidenzia come il recente allarme sollevato nei confronti delle apparecchiature RadioLan e HiperLan sia ampiamente ingiustificato.

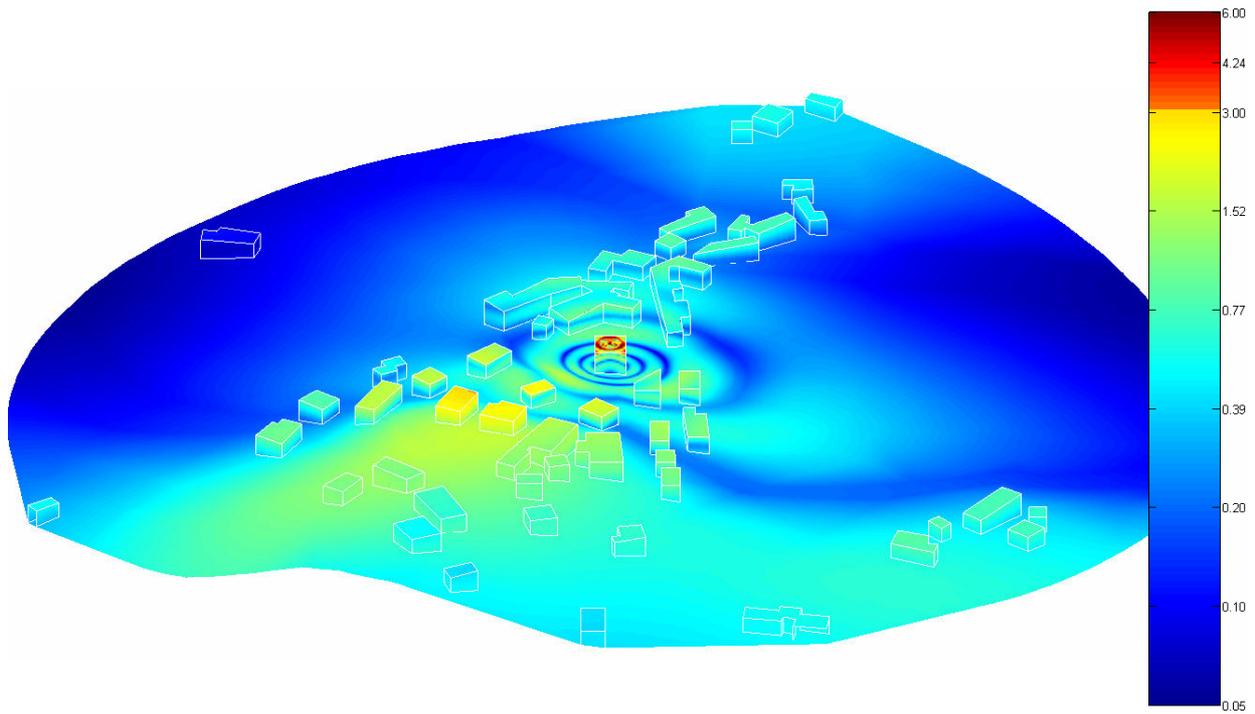


Figura 1 Mappa cromatica del campo elettrico [V/m] irradiato da una stazione radio base UMTS con potenza di apparato pari a 20 W e sistema di antenna tri-settoriale con guadagno pari a 15 dBi. Immagine ottenuta mediante il software di propagazione iXem-Prop, sviluppato presso i Laboratori iXem del Politecnico di Torino.

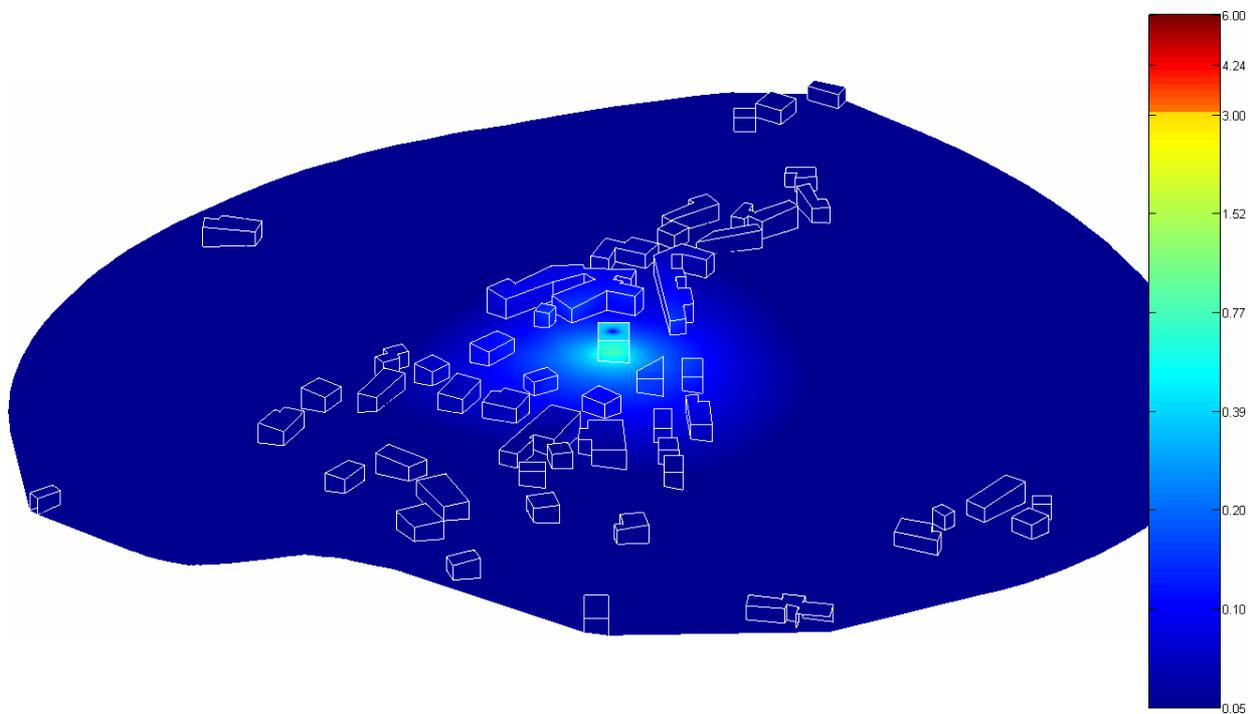


Figura 2 Mappa cromatica del campo elettrico [V/m] irradiato da un telefono in comunicazione con massima potenza di emissione. Immagine ottenuta mediante il software di propagazione iXem-Prop, sviluppato presso i Laboratori iXem del Politecnico di Torino.

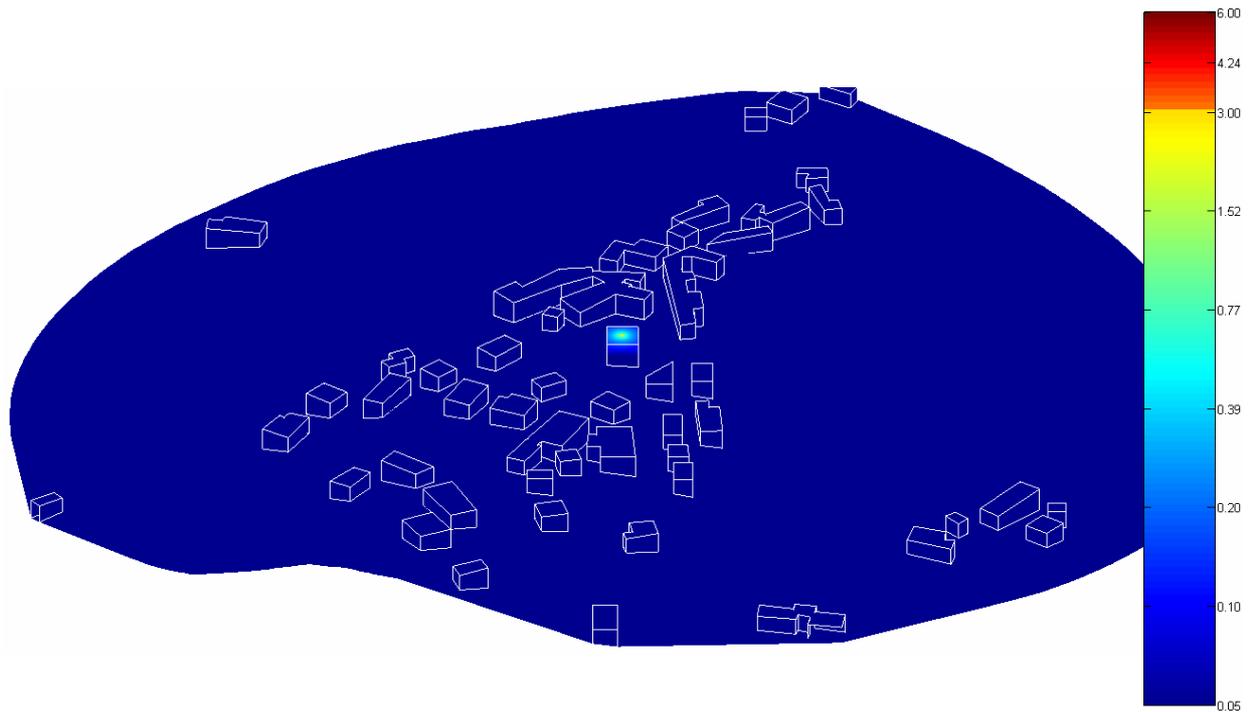


Figura 3 *Mapa cromatica del campo elettrico [V/m] irradiato da un access point Wi-Fi con antenna omnidirezionale (dipolo) nella banda a 2.4 GHz. Immagine ottenuta mediante il software di propagazione iXem-Prop, sviluppato presso i Laboratori iXem del Politecnico di Torino.*

MISURA DEL CAMPO ELETTROMAGNETICO IRRADIATO DA APPARATI RADIO DIGITALI A BANDA LARGA

La strumentazione e le procedure utilizzate per la stima dell'esposizione al campo elettromagnetico a radiofrequenza derivano, storicamente, dalla Compatibilità Elettromagnetica Irradiata, per la quale lo scopo della misura è quello di valutare la distribuzione del "rumore" per unità di banda [8], [9], e il rumore può essere interpretato come una somma di diversi contributi monocromatici e incoerenti. Seguendo la stessa procedura, i segnali modulati in analogico, utilizzati nelle comunicazioni a radiofrequenza, sono sempre stati misurati con sonde di campo (procedura di misura a banda larga), in grado di fornire una stima del campo cumulativo su una banda assegnata [10], oppure utilizzando analizzatori di spettro, in grado di assegnare ad ogni contributo la stima del corrispondente valore di campo (procedura di misura a banda stretta).

È stato dimostrato che le sonde di campo non offrono adeguata affidabilità quando vengono utilizzate per la misura dei segnali digitali, soprattutto se ad ampia banda di modulazione [11]. In generale le sonde di campo possono fornire risultati affetti da sovrastima, tanto più evidente quanto più limitata è la dinamica del circuito che esegue l'integrazione del segnale, rispetto alla dinamica del segnale oggetto della misura. La sovrastima non dipende né dalla complessità di modulazione, né dalla percentuale di frame effettivamente impegnato in trasmissione, né dall'occupazione di banda dello stesso, ma solo dalla potenza del segnale. A tal proposito, si riportano in Figura 4 alcuni risultati tratti da [11] e relativi ad una sonda che evidenzia, in presenza di campo elevato (maggiore di 6 V/m) una sovrastima anche superiore a 3 dB.

Allo stesso modo, le procedure di misura a banda stretta richiedono l'utilizzo di apparecchiature dedicate (analizzatori equipaggiati con demodulatore digitale) [12], [13], [14], [15] e [16]. È possibile introdurre, come si fa normalmente per la misura di segnali analogici (AM, FM, TV: [17]-[18]-[19]), procedure di estrapolazione [20], [21] e [22] basate sulla misura di una parte dello spettro o del suo involuppo. Soprattutto nel caso di segnali ad ampio spettro [22], si tratta tuttavia

di procedure complesse, che richiedono buona esperienza da parte dell'operatore che esegue la misura e necessitano di un'attenta verifica delle condizioni di funzionamento del trasmettitore oggetto di indagine sperimentale. Per questo motivo si suggerisce, quando possibile, l'utilizzo di un analizzatore dedicato.

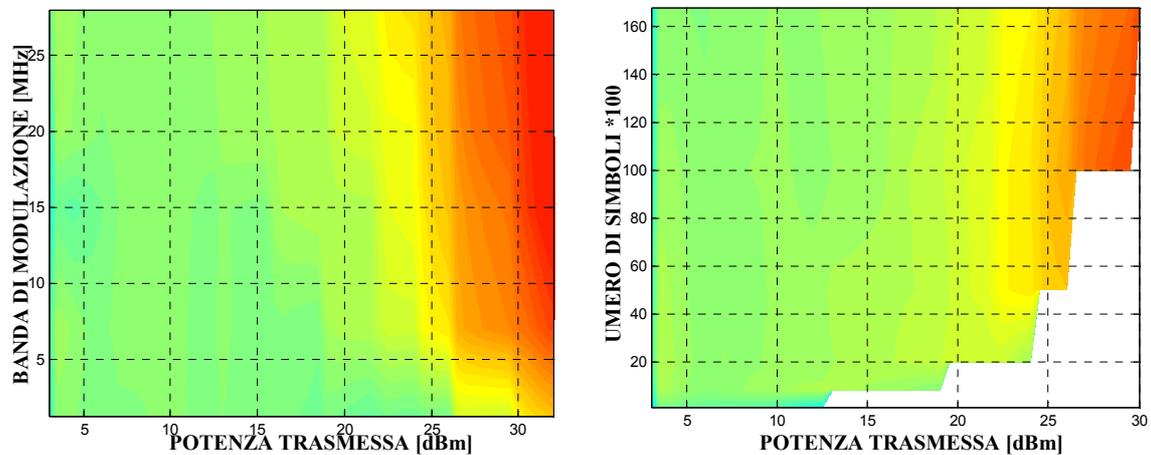


Figura 4 Rapporto di lettura tra misure effettuate in presenza di una segnale modulato a banda larga e un segnale non modulato, al variare della banda, della complessità di modulazione e della potenza trasmessa. Le misure sono state effettuate mediante una comune sonda commerciale, non calibrata per la misura di segnali digitali a banda larga. Risultati tratti da[11].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Trincherò D., “I sistemi wireless per telecomunicazione digitale a banda larga. Caratteristiche di base, tecniche di misura e valutazione dell'esposizione”, atti del Terzo Convegno Nazionale - Controllo ambientale degli agenti fisici: dal monitoraggio alle azioni di risanamento e bonifica, Biella, 6-9 giugno 2006.
- [2] IEEE Std 802.11™-2007, “IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems— Local and metropolitan area networks— Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications”, (Revision of IEEE Std 802.11-1999), 12 June 2007.
- [3] Std 802.16™-2004 “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems”, 1 October 2004
- [4] IEEE Std 802.16e™-2005 and IEEE Std 802.16™-2004/Cor1-2005 “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands and Corrigendum 1”, (Amendment and Corrigendum to IEEE Std 802.16-2004), 28 February 2006.
- [5] D. Trincherò, A. Galardini, R. Stefanelli, E. Guariso, F. Cambiotti, F. Troisi, L. Baldacci, D. Della Monica, E. Ragno, R. Moriondo, M. Ancilli, S. Schiavi, “An independent, low cost and open source solution for the realisation of wireless links over huge multikilometric distance”, IEEE Radio and Wireless Symposium, Orlando, USA, 22-24 January 2008, pp. 495-498.
- [6] ECC RECOMMENDATION (04)05 “GUIDELINES FOR ACCOMMODATION AND ASSIGNMENT OF MULTIPOINT FIXED WIRELESS SYSTEMS IN FREQUENCY BANDS 3.4-3.6 GHz AND 3.6-3.8 GHz”.
- [7] ERC RECOMMENDATION 70-03 “RELATING TO THE USE OF SHORT RANGE DEVICES (SRD)”.
- [8] Clayton R. Paul, Introduction to Electromagnetic Compatibility, NY, Wiley, 1992.
- [9] 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.

- [10] M. Kanda, "Standard probes for electromagnetic field measurements", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume 41, Issue 10, Oct. 1993 pp. 1349 – 1364.
- [11] Trincherò, D., Fiorelli B., Stefanelli R., S., Anglesio, L., Benedetto, A., Trincherò, S., d'Amore, G., Borsero, M., Vizio, "Electromagnetic Field Measurement in Presence of Radiofrequency Wideband Digital Signals", to be published in the URSI General Assembly, August 7-17 2008, Chicago, USA.
- [12] Agilent, Application Note 1380-1 "RF Testing of Wireless LAN Products".
- [13] Rohde & Schwarz, Application Note 1MA69, "WLAN Tests According to Standard 802.11a/b/g".
- [14] Agilent, Application Note 1380-2 "IEEE 802.11 Wireless LAN PHY Layer (RF) Operation and Measurement".
- [15] Agilent, Application Note 1380-4 "Making 802.11G Transmitter Measurement".
- [16] Agilent, Application Note "IEEE 802.16-2004 WiMAX PHY layer Operation and Measurement".
- [17] Norma CEI 211-7 Fascicolo 5909 "Guida per la misura e per la valutazione di campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza compresa tra 10 kHz – 300 GHz".
- [18] ANPA – Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente – "Guida tecnica per la misura dei campi elettromagnetici compresi nell'intervallo di frequenza 100 KHz – 3 GHz in riferimento all'esposizione della popolazione".
- [19] Norma CEI 211-10 Fascicolo VI "Guida alla realizzazione di una stazione radio base per rispettare i limiti di esposizione ai campi elettromagnetici in alta frequenza".
- [20] Norma CEI 211-10 Appendice H. "Metodologie di misura per segnali UMTS".
- [21] S. Trincherò, A. Benedetto, L. Anglesio, G. d'Amore and D. Trincherò, "Exposure measuring techniques for wide band mobile radiocommunications", Radiation Protection Dosimetry Vol. 111, No. 4 Oxford University Press 2004.
- [22] Borghi, I., Campana, P., Trincherò, D., "Utilizzo dell'analizzatore di spettro per la misura di segnali a radiofrequenza con banda superiore a quella dell'ultimo filtro IF del front-end", atti del Terzo Convegno Nazionale - Controllo ambientale degli agenti fisici: dal monitoraggio alle azioni di risanamento e bonifica, Biella, 6-9 giugno 2006.