

Ricezione portatile indoor DVB-T

ing. Andrea Bertella,
ing. Paolo Benvenuto Forni,
ing. G. Giancane,
ing. Bruno Sacco,
p.i. Mirto Tabone

Rai - Centro Ricerche e Innovazione
Tecnologica Torino

1. Introduzione

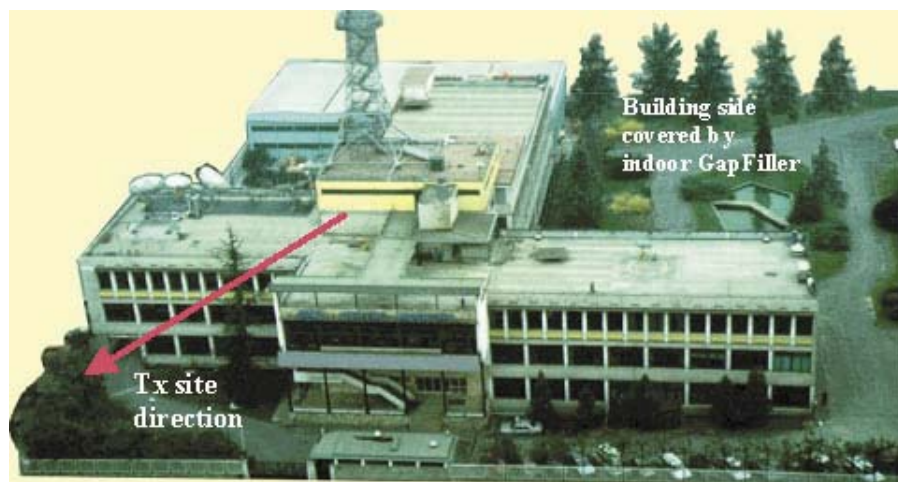
Nel 1998 la Rai ha presentato al Ministero delle Comunicazioni un piano articolato di sperimentazione sulla televisione digitale terrestre (DVB-T). Tale piano, sviluppato in ambito al Comitato Nazionale per lo sviluppo dei Sistemi Digitali costituito dall'Autorità Garante per le Comunicazioni, prevede una serie di sperimentazioni su alcune aree pilota in ambiente urbano e suburbano [1].

Le prime sperimentazioni DVB-T hanno avuto inizio nella città di Torino sin dal Febbraio del 1998 e sono state indirizzate principalmente alla valutazione delle prestazioni del sistema DVB-T in varie condizioni di ricezione – fissa con antenna direttiva, mobile, e con apparati riceventi portatili all'interno degli edifici (ricezione indoor) – nonché alla identificazione dei

requisiti del nuovo servizio di televisione digitale terrestre.

Le problematiche relative alla ricezione portatile indoor sono state valutate assumendo come riferimento l'edificio del Centro Ricerche (Rai-CRIT) (Figura 1), che si sviluppa su tre piani realizzati in cemento, occupa una superficie totale di circa 800 m² ed è caratterizzato da ampie finestre, in parte rivolte verso il trasmettitore Rai di Torino-Eremo, situato in linea d'aria ad una distanza di circa 5 chilometri.

Fig. 1 - Edificio di Rai-CRIT nel quale si sono effettuate le prove di ricezione indoor



Sommario

Nel Febbraio 1998 il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della Rai (Rai-CRIT) ha iniziato le prime campagne di sperimentazione sulla televisione digitale terrestre (DVB-T) nell'area torinese. Lo scopo principale di tale iniziativa era la valutazione tecnica delle prestazioni del sistema - alla cui definizione Rai-CRIT aveva contribuito direttamente in ambito al Progetto Europeo DVB (Digital Video Broadcasting) - e la individuazione dei requisiti di servizio.

Il presente articolo descrive i risultati delle prove riguardanti la ricezione portatile "indoor", ossia all'interno degli edifici, che rappresenta un'importante possibilità offerta dalla DVB-T all'utenza domestica. Le valutazioni sono state effettuate in oltre 140 punti distribuiti sui tre piani dell'edificio di Rai-CRIT.

E' stata inoltre valutata l'efficacia di ripetitori in banda per uso domestico (gap-filler) impiegati per migliorare la ricezione DVB-T nelle aree dell'edificio soggette a forte attenuazione del segnale ricevuto via etere a causa delle infrastrutture in muratura e la sfavorevole posizione (fuori vista) rispetto all'impianto trasmittente DVB-T. In particolare è stata analizzata l'influenza sulla qualità di ricezione dovuta agli echi corti e di forte intensità, che caratterizzano la ricezione portatile indoor, ed è stata valutata la compatibilità dei gap-filler ai limiti di esposizione ai campi elettromagnetici stabiliti dalla normativa nazionale vigente. Infine vengono presentate le caratteristiche tecniche di un sistema ricevente d'antenna a "diversity spaziale", appositamente sviluppato da Rai-CRIT per migliorare la ricezione DVB-T indoor, e se ne riportano i risultati delle prove di ricezione.

Tra le numerose possibili modalità di trasmissione del segnale DVB-T si è adottata, nelle prove di ricezione fissa (con antenna direttiva) e portatile (con antenna omnidirezionale), la seguente configurazione:

64QAM, rate 2/3
2K/8K mode;
 $\Delta = 1/32$ (intervallo di guardia)
bit-rate utile: 24,13 Mbit/s
 $C/N \approx 18,5$ dB alla soglia di errore (QEF) su canale ideale

Nota 1.
Tabella A1.6
pagina 32.

Nota 2.
Il guadagno dell'antenna è pari a -3 dB; l'attenuazione del cavo posto fra antenna e ricevitore è pari a 2 dB.

Questa configurazione di trasmissione privilegia la "capacità trasmissiva", che è ritenuta condizione essenziale nella fase di lancio dei nuovi servizi DVB-T onde sopperire alla scarsità di risorse in frequenza al momento disponibili. Altre configurazioni, quali ad esempio il 16QAM, rate $3/4$, attualmente all'esame in Gran Bretagna dove i servizi DVB-T sono operativi dal novembre 1998, consentono di aumentare la robustezza del sistema ($C/N = 14,5$ dB) a scapito però di una riduzione della capacità trasmissiva (bit-rate utile = 18,10 Mbit/s). La configurazione 16QAM potrebbe quindi assumere un maggiore interesse, nel nostro Paese, in una seconda fase quando i servizi DVB-T saranno a regime e la ripianificazione dello spettro di frequenze operativa.

Il trasmettitore RAI di Torino-Eremo è caratterizzato da una potenza irradiata (ERP) di 300W sul canale 28 (UHF), in polarizzazione

verticale, con una copertura potenziale del servizio che si estende sulla città di Torino e sulle aree suburbane limitrofe.

La piattaforma tecnologica di codifica/multiplicazione del segnale DVB-T è installata presso Rai-CRIT; il segnale digitale multiplexato a livello TS (Transport Stream) viene trasportato al centro trasmittente, per mezzo di un collegamento in ponte radio digitale SDH, dove viene effettuata la modulazione COFDM e la messa in onda.

2. Ricezione portatile indoor: configurazione di misura

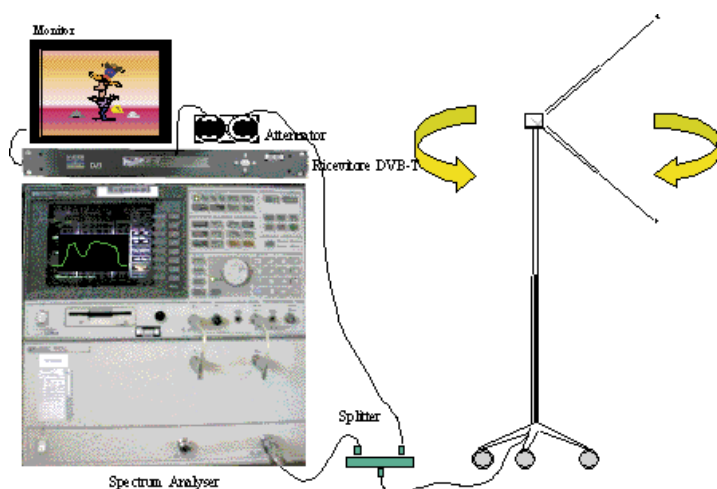
Precedenti valutazioni in area di servizio con la potenza di trasmissione sopra specificata [2] hanno stabilito in 80 dBmV/m circa il livello del campo e.m. disponibile a 10 metri di elevazione rispetto al suolo; ciò corrisponde approssimativamente all'altezza del tetto dell'edificio del Centro Ricerche (per i dettagli si rimanda al prossimo paragrafo).

Tale valore fornisce un margine sul livello del campo e.m. alla soglia di corretta ricezione del segnale (QEF, quasi error free) di circa 38 dB. Il livello del campo richiesto risulta quindi di 42 dBmV/m, valore che conferma le assunzioni di base della CEPT [1]^{Nota1} nella Conferenza di Chester del 1997: per ottenere in ricezione fissa con antenna direttiva un valore del rapporto portante/rumore (C/N) pari a 20 dB – come richiesto dal segnale DVB-T in configurazione 64QAM 2/3, tenendo conto di un opportuno margine di implementazione – è necessario un valore del campo e.m. di almeno 44 dBmV/m.

Il set-up di misura adottato per le prove di ricezione indoor è rappresentato in Figura 2.

E' stata utilizzata un'antenna a dipolo, dalla tipica forma a "V", comunemente impiegata per la ricezione televisiva analogica portatile^{Nota2}; tuttavia, essendo la polarizzazione in trasmissione verticale, tale antenna è stata utilizzata con una rotazione di 90°.

Fig. 2 - Set-up di misura per la ricezione portatile indoor.



Tab. 1 - Valore medio e deviazione standard del campo e.m.

	Primo piano	Secondo piano	Terzo piano
Valore medio (dB _{μV/m})	78,60	81,45	80,75
Deviazione standard (dB _{μV/m})	1,79	1,32	2,82

Sono state valutate, sui quattro piani dell'edificio, oltre 140 posizioni, arbitrariamente scelte, ma omogeneamente distribuite. Per ciascun piano è stata effettuata una misura preliminare del campo e.m. all'esterno delle finestre in linea diretta (in vista) con il trasmettitore; ciò ha fornito i livelli di riferimento per il successivo calcolo delle perdite sul livello del campo e.m. dovute alla attenuazione introdotta dai muri dell'edificio (Building Penetration Loss, BPL).

Le valutazioni sono state effettuate in due fasi successive.

Prima fase

In ciascun punto di misura si sono adottate le seguenti procedure:

- ◆ Misura del campo e.m. all'esterno dell'edificio a diverse altezze corrispondenti ai vari piani e all'ingresso del ricevitore: da questi valori si sono dedotte le perdite di penetrazione nell'edificio (BPL).
- ◆ Impiegando un sistema di telecomando è stata modificata la posizione dell'antenna entro un raggio di 20-30 cm alla ricerca della condizione migliore di ricezione, come suggerito in [4] ^{Nota3}.
- ◆ Sono stati misurati la potenza del segnale ricevuto (P_{in}), il tasso d'errore (BER), la qualità dell'immagine e del suono, il margine di ricezione ^{Nota4}.
- ◆ Si è valutata quindi la copertura percentuale del servizio all'interno dell'edificio.

Seconda fase

- ◆ E' stato introdotto un "gap filler" (ossia un ripetitore sul canale 28 installato al 2° piano) per consentire la ricezione nei punti dell'edificio in cui dalle misure della prima

fase non era risultata possibile.

- ◆ Sono state valutate le prestazioni di due tipi d'antenna trasmittente per il gap filler (Yagi e omnidirezionale).
- ◆ E' stato infine utilizzato un criterio di valutazione più stringente che esclude l'ottimizzazione della posizione dell'antenna ricevente omnidirezionale.
- ◆ Nelle varie condizioni di misura è stata valutata la copertura percentuale del servizio.

2.1 Risultati della prima fase

La potenza del segnale r.f. ricevuto (P_{in}) all'esterno delle finestre di Rai-CRIT è stata misurata in sei punti per ogni piano. Si è impiegato allo scopo un automezzo dotato di albero estensibile con antenna di misura log-periodica (guadagno di 6 dB) e un ricevitore di misura Rohde&Schwarz tipo ESVB; è stata quindi applicata la formula seguente per la valutazione del campo e.m. disponibile:

$$E [dB_{\mu V/m}] = P_m [dB_{\mu V}] + 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c_o} \right) - G + A$$

dove:

- P_{in} = potenza del segnale, misurata con lo strumento ESVB
- f = frequenza = 530 MHz
- C_o = velocità della luce = 3 · 10⁸ m/s
- G guadagno dell'antenna ricevente = 6 dB
- A = attenuazione del cavo = 8,2 dB

In Tabella 1 sono riportati, per i tre piani dell'edificio, il valore medio e la deviazione standard del campo e.m. ricevuto. Tali valori sono in buon accordo con la copertura stimata su Torino, nel corso di precedenti prove in area

Nota 3.
Sezione 4.4
pagina 4-2.

Nota 4.
Per ottenere il margine di ricezione, il livello del segnale proveniente dall'antenna è stato attenuato fino al raggiungimento della soglia QEF. L'attenuazione corrisponde al margine di ricezione.

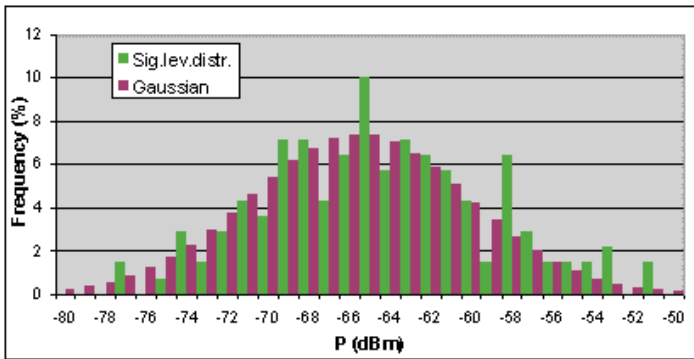


Fig. 3 - Densità di probabilità del segnale ricevuto e curva gaussiana teorica.

di servizio [2] che indicano un valore di campo di circa 80 dBmV/m ^{Nota 5} presso il sito di Rai-CRIT.

La Figura 3 mostra come la densità di probabilità della potenza del segnale ricevuto (P_{in}) approssimi sensibilmente la legge gaussiana, con un valor medio di -65,7 dBm e una deviazione standard di 5.4 dBm. Tale comportamento è simile a quello già emerso nelle prove preliminari di campo svolte presso altri laboratori [5].

Il valore del rapporto C/N al ricevitore può essere ricavato dalla potenza del segnale ricevuto, come segue:

$$\frac{C}{N} = \frac{C_{\psi}}{KT_0 B(F_{RX} - 1)}$$

dove:

C_{ψ} = livello segnale r.f. ricevuto [W]
 K_y = costante di Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/s;
 F_{RX} = figura di rumore del ricevitore = 5,01
 (corrispondente a 7 dB)
 T_0 = temperatura [k]
 B = larghezza di banda del canale = 7,61 MHz

Per una buona ricezione del segnale DVB-T, il valore del rapporto C/N disponibile nei punti di misura deve essere maggiore del valore di C/N caratteristico della configurazione di trasmissione adottata, onde garantire un certo margine di ricezione.

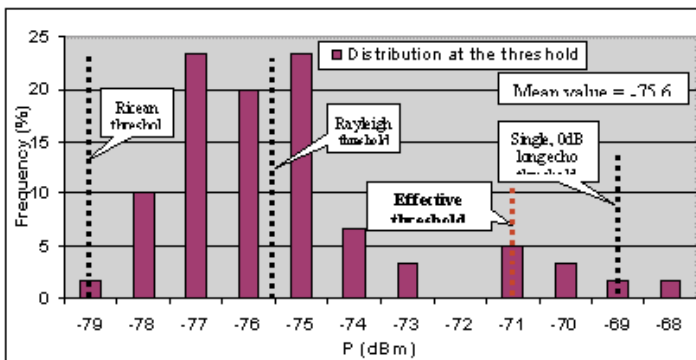
A causa delle diverse configurazioni degli echi sul segnale ricevuto, riscontrate nei vari casi, il livello del segnale richiesto alla soglia di funzionamento QEF del ricevitore può essere assai variabile; sono stati rilevati alcuni casi in cui esso si trovava parecchi dB al di sopra del valore previsto nel caso ideale di rumore bianco gaussiano additivo (AWGN). Come conseguenza la distribuzione del livello del segnale alla soglia QEF si scosta sensibilmente dalla legge gaussiana, come si può osservare in Figura 4. In tale figura sono indicati i livelli del segnale nei casi di canale di Rice (ricezione con antenna direttiva) e di canale di Rayleigh (ricezione con antenna omnidirezionale). Sono inoltre indicati due livelli di potenza alla soglia aggiuntivi (Effective Threshold Level e Single 0dB longecho threshold), descritti successivamente, e utili ai fini della valutazione della ricezione indoor.

In particolare, sono stati rilevati alcuni punti di misura in cui non era possibile la ricezione, sebbene il livello segnale r.f. ricevuto fosse significativamente più alto rispetto a quello previsto alla soglia di Rayleigh che caratterizza, teoricamente, la ricezione con antenna omnidirezionale (è questo il caso della ricezione con terminali portatili).

In Figura 4, la parte destra della distribuzione tiene conto solo parzialmente delle "anomalie" riscontrate in alcuni punti; infatti in tali punti, anche con un livello del segnale di parecchi dB

Nota 5.
A 10 metri "above ground level".

Fig. 4 - Distribuzione della potenza del segnale alla soglia di funzionamento del ricevitore.



al di sopra della soglia con "eco lungo singolo", a C/I=0 dB (ossia con livello dell'eco uguale a quello del segnale principale), il ricevitore non è stato in grado di funzionare; poiché nei suddetti casi non vi era margine di ricezione, tali punti non sono stati inclusi nell'istogramma.

Successive analisi hanno permesso di scoprire che in tali casi, lo spettro del segnale COFDM era caratterizzato dalla presenza di "buchi" corti e profondi (si rimanda al §2.4) attribuibili all'effetto di echi vicini.

Allo scopo di meglio descrivere l'ambiente indoor in termini di soglia di ricezione è stato introdotto un parametro empirico per individuare il livello effettivo della potenza alla soglia, chiamato Effective Threshold Level, ETL e dedotto a partire dal valore medio, MV (dBm) e dalla deviazione standard, SD (dBm) del segnale ricevuto. Tale parametro è dato dalla somma di MV con il valore di SD moltiplicato per due.

Nel nostro caso:

$$ETL = -75,6 \text{ dBm} + 2 * 2,3 \text{ dBm} = -71 \text{ dBm}$$

La Figura 5 illustra la distribuzione cumulativa del livello di potenza del segnale all'ingresso del ricevitore. Da tale curva, assumendo che il rapporto C/N richiesto dal sistema alla soglia QEF sia costante e corrisponda alla soglia ETL

(-71 dBm corrispondenti a C/N = 28 dB), si deduce, una ricezione DVB-T corretta in circa l'85% dei casi.

Una volta ottenuti i valori relativi al campo e.m. all'interno dell'edificio, è stato possibile risalire ai valori del Building Penetration Loss (BPL), ossia dell'attenuazione introdotta dalle infrastrutture dell'edificio. Questa grandezza è definita come "differenza tra il valore del campo nel punto di misura all'interno della stanza e quello all'esterno dell'edificio alla stessa altezza rispetto al suolo".

E' stato preso in considerazione soltanto il lato dell'edificio situato di fronte al sito trasmittente di Torino-Eremo. I risultati di tali misure sono sinteticamente riportati in Tabella 2.

Field strength (dB μ V/m) 2 nd floor (m.v.)	74.40
Standard deviation (dB μ V/m) 2 nd floor	2.63
Field strength (dB μ V/m) 2 nd floor ext. (m.v.)	81.45
Building Penetration Loss (dB) 2 nd floor	7.00
Field strength (dB μ V/m) 1 st floor (m.v.)	74.00
Standard deviation (dB μ V/m) 1 st floor	4.51
Field strength (dB μ V/m) 1 st floor ext. (m.v.)	78.60
Building Penetration Loss (dB) 1 st floor	4.60
Field strength (dB μ V/m) (m.v.) 1 st + 2 nd	74.20
Standard deviation (dB μ V/m) 1 st + 2 nd	3.62
Field strength (dB μ V/m) ext. (m.v.) 1 st + 2 nd	80.02
Building Penetration Loss (dB) 1 st + 2 nd	5.80

Tab. 2 - Risultati relativi alle perdite di penetrazione (BPL).

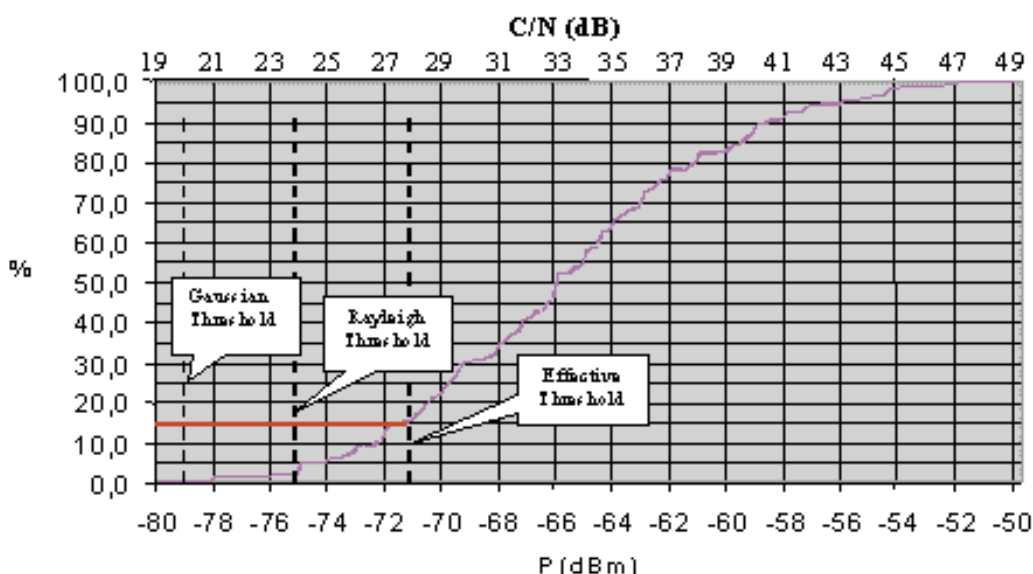


Fig. 5 - Distribuzione cumulativa del livello di potenza del segnale ricevuto.

E' necessario sottolineare come siano stati presi in considerazione soltanto punti relativi al primo ed al secondo piano dell'edificio, in quanto il terzo piano, oltre ad avere una superficie piuttosto limitata, è situato su di un'area piccola del tetto (si osservi la Figura 1) ed è sovrastato da alcune strutture in ferro che potrebbero fortemente influenzare il livello del campo e.m. ricevuto.

I risultati riportati in Tabella 2 sono in buon accordo con quelli ottenuti attraverso le campagne di misura effettuate da altri organismi europei [5].

I valori medi di BPL risultano compresi tra 4,6 dB e 7 dB, rispettivamente per il primo e il secondo piano. Tali valori forniscono una prima importante indicazione sugli effetti introdotti dagli edifici nella ricezione indoor del segnale DVB-T in termini di attenuazione del campo e.m. ricevuto via etere.

2.2 Copertura con gap-filler

Risultati

Per estendere la copertura del servizio indoor alle aree dell'edificio non servite nelle condizioni normali di ricezione con semplice antenna omnidirezionale, è stato installato ad un piano intermedio (secondo piano) un gap-filler a bassa potenza (2 mW) operante in banda sul canale 28/UHF. Si tratta di un apparato rice-trasmittente che riceve il segnale r.f. da un'antenna situata sul tetto e reirradia il segnale all'interno dell'edificio sullo stesso canale. Naturalmente l'impiego di tale dispositivo non è necessario qualora le condizioni di ricezione siano già soddisfacenti.

E' opportuno sottolineare che, poiché le misure hanno dimostrato che nella parte dell'edificio fuori vista dal trasmettitore di Torino-Eremo la ricezione indoor risulta difficile e comunque sensibilmente peggiore rispetto alle zone in vista, le misure con il gap-filler sono state effettuate soltanto sui tre piani dell'edificio localizzati in tale area. Per valutare l'efficacia del gap-filler, si è simulata una situazione di cattiva ricezione introducendo un'attenuazione

aggiuntiva sul segnale all'ingresso del ricevitore DVB-T; con tale procedura si è rilevato che nei punti critici selezionati, la copertura del servizio, senza gap-filler, non avrebbe superato il valore di 50%.

I risultati delle prove sono promettenti ed indicano che l'impiego di un solo gap-filler, con una potenza di uscita di 2mW per canale, è sufficiente per ottenere globalmente la copertura sui tre piani (superficie totale di circa 800 m²).

I dati raccolti sembrano inoltre indicare che l'antenna trasmittente omnidirezionale del gap-filler è, in media, più efficace dell'omologa antenna direzionale.

Tali risultati, dunque, indicano che la potenza d'uscita di 2 mW del gap filler – per canale r.f. – è sufficiente a fornire una copertura dell'edificio molto estesa, ma anche che, probabilmente, per abitazioni di più piccole dimensioni, tale valore potrebbe essere ulteriormente ridotto.

Oltre ad aumentare il livello del segnale r.f., l'impiego del gap-filler ha migliorato globalmente le prestazioni del sistema nei confronti degli echi vicini, spesso riducendo le variazioni dello spettro del segnale CO-FDM, uniformandone l'andamento in banda e consentendo quindi al ricevitore di operare in condizioni meno critiche. Infatti, utilizzando il gap-filler, il valore del livello del segnale alla soglia di corretta ricezione (ETL) è risultato di circa 3 dB inferiore al valore corrispondente in assenza di tale dispositivo (-74 dBm invece di -71 dBm).

Inoltre, utilizzando il gap-filler, un valore medio di -63,4 dBm per il livello del segnale ricevuto, è risultato sufficiente a garantire una buona ricezione nell'80% dei casi, anche in presenza di perturbazioni dovute al passaggio di persone intorno all'antenna ricevente; tale percentuale sale al 100% qualora venga riposizionata di volta in volta l'antenna ricevente.

L'isolamento tra le antenne trasmittente e ricevente del gap-filler non è risultato critico,

in quanto tali antenne sono lontane tra di loro di circa 20 metri e sono inoltre separate da diverse pareti in muratura.

Aspetti inerenti all'inquinamento elettromagnetico

L'impiego del gap-filler a livello indoor costituisce una potenziale fonte d'inquinamento elettromagnetico; è quindi importante accertare se possono sorgere problemi circa il rispetto della normativa vigente relativamente ai limiti di campo e.m. tollerati. Questa valutazione è stata fatta tenendo conto dello scenario più generale in cui tutti i canali r.f. disponibili in area di servizio vengano reirradiati indoor mediante una schiera di gap-filler (di potenza 2 mW ciascuno) installati nell'edificio.

E' stata pertanto effettuata una valutazione teorica dei livelli di campo elettromagnetico (in campo lontano) ottenibili nelle seguenti ipotesi:

guadagno di antenna $G_t = 4$ dBi. (è il caso peggiore di guadagno di antenna utilizzato durante le prove; è un valore verosimile per una piccola antenna a banda larga)

potenza per canale r.f. $P_t = 2$ mW
numero di canali r.f.
reirradiati $N = 20$

Le limitazioni di base per l'esposizione ai campi elettromagnetici sono state inizialmente stabilite da Organismi internazionali, come il WHO (*World Health Organisation*); successivamente le autorità nazionali hanno convertito tali indicazioni in disposizioni di legge che tengono conto anche delle realtà locali, là dove necessario. I principali Standard, attualmente, provengono dalla Commissione Internazionale per la Protezione da Radiazioni Non Ionizzanti (*International Commission for Non Ionising Radiation Protection*), ICNIRP (già IRPA) [6]; in Europa opera il CENELEC, Commissione per gli standard elettrotecnici [7]; in Italia, il Comitato Elettrotecnico Italiano, CEI, si è uniformato allo Standard Europeo [8]; recentemente i limiti stabiliti in ambito nazionale nell'ultimo standard sono stati ulteriormente ristretti attraverso

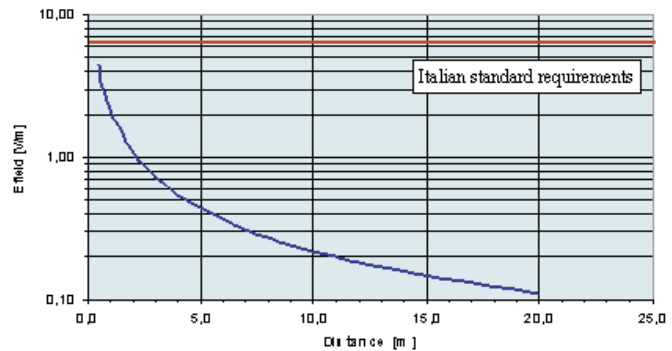


Fig. 6 - Campo elettrico [V/m] in funzione della distanza [m] dall'antenna trasmittente del gap-filler ($G_t = 4$, $P_t = 40$ mW).

un Decreto Legge ad hoc [9].

La Figura 6 indica il livello del campo e.m. valutato nelle ipotesi precedenti in funzione della distanza dall'antenna trasmittente del gap-filler. Confrontando i valori della curva con quello di riferimento della normativa nazionale (6 V/m) è possibile concludere che l'utilizzo dei gap-filler, nella configurazione proposta (20 canali DVB-T reirradiati), può soddisfare i limiti tollerati di esposizione umana definiti dalla normativa vigente, purché venga rispettata una distanza di guardia dell'ordine di un metro.

2.3 Probabilità di copertura su un'area ristretta

Come si è detto in precedenza i risultati della prima fase di sperimentazione indoor sono stati ottenuti in condizioni ottimali in quanto l'antenna ricevente dell'apparato portatile è stata orientata, entro un raggio di 20-30 cm, alla ricerca della migliore condizione di ricezione sul canale 28/UHF; tale ricerca, tuttavia, risulta assai complicata nelle vicinanze della soglia di ricezione, ossia in condizioni critiche dovute alla presenza di echi multipli. Inoltre va aggiunto che i test hanno evidenziato un'elevata sensibilità delle condizioni di ricezione al passaggio di persone attorno all'antenna, in modo particolare nei casi in cui il margine di ricezione era basso.

E' stata quindi condotta un'ulteriore sessione di misure (seconda fase) per valutare la probabilità di corretta ricezione nel caso più generale in cui non venga ottimizzato l'orientamento dell'antenna ad ogni cambio di sintonia del

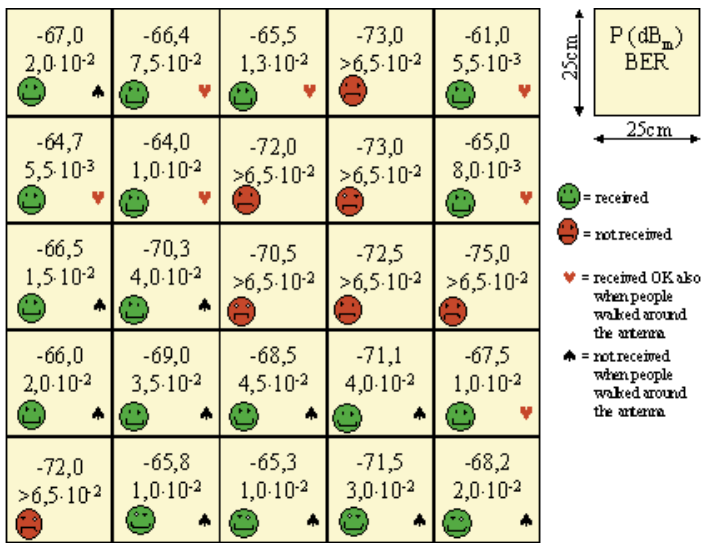


Fig. 7 - Esempio dei risultati relativi ad una "area critica".

ricevitore su un nuovo canale r.f.; inoltre si è voluta accertare la sensibilità della ricezione dalla situazione al contorno, ad esempio in presenza di oggetti in movimento (persone e/o cose).

Le misure sono state effettuate su tre aree di forma quadrata (circa 1,5 x 1,5 metri) all'interno dell'edificio. In ciascuna di tali aree sono stati esaminati 25 punti (corrispondenti a settori quadrati di 25 x 25 cm) localizzati su di una griglia (Figura 7), valutando la potenza d'ingresso (P_{in}), il tasso d'errore (BER) e la qualità dell'immagine. Si noti che il BER alla soglia di corretta ricezione corrisponde a $6 \cdot 10^{-2}$.

Una delle tre aree quadrate è localizzata in un settore dell'edificio caratterizzato da notevoli difficoltà di ricezione; i risultati delle misure sono riportati, a titolo di esempio, in Figura 7. La simbologia adottata in tale figura illustra direttamente la qualità di ricezione in ciascuno

dei 25 settori dell'area interessata, indicando anche i valori misurati di P_{in} e BER nonché la sensibilità della ricezione alla presenza di persone in movimento. Le valutazioni sono state effettuate con e senza il gap-filler.

Le altre due aree si trovano nella parte dell'edificio in vista del trasmettitore di Torino-Eremo; in tale caso, ovviamente, sono state valutate esclusivamente le prestazioni senza gap-filler in quanto la ricezione è normalmente buona.

La Tabella 3 riporta globalmente i risultati delle misure relativi alle tre aree considerate: le prime due colonne riguardano la ricezione diretta senza gap-filler (anche in presenza di persone in movimento intorno all'antenna), le seconde due includono il gap-filler. Si osservi come nell'area 1, dove la ricezione è più difficile, l'introduzione del gap-filler consente una copertura del 100%, in condizioni statiche al contorno, che scende all'80% in presenza di persone in movimento.

E' possibile osservare come, quando il quadrato di misura è situato in un settore dell'edificio in cui il livello del segnale ricevuto è, in media, vicino alla soglia di ricezione, la percentuale di copertura (72%) non è significativamente inferiore rispetto agli altri due quadrati (76% e 80%), ma la ricezione risulta fortemente influenzata dal passaggio di persone attorno all'antenna.

Un ulteriore notevole risultato consiste nel fatto che un segnale di potenza media di -63,4 dBm (circa 10 dB superiore all'ETL) è sufficiente a garantire una copertura percentuale dell'80% in presenza di disturbi apportati dal passaggio di individui. Ciò dimostra che l'influenza sulla qualità di ricezione dovuta alla presenza di persone in movimento in prossimità dell'antenna si può quantizzare in un aumento di

Tab. 3 - Probabilità di copertura su un'area ristretta.

Coverage probability %					
Location	Test ->	No gap-filler No people	No gap-filler People around	Gap-filler No people	Gap-filler People around
Square 1 (Diff. Reception)		72%	28%	100%	80%
Square 2 (Easy reception)		76%	52%	n.a.	n.a.
Square 3 (Easy reception)		80%	36%	n.a.	n.a.

potenza dell'ordine di 10 dB richiesta per ricevere correttamente, rispetto al caso di ricezione stazionaria senza riposizionamento dell'antenna.

L'impiego del gap-filler permette di risolvere il problema suddetto, aumentando sensibilmente la percentuale di punti con buona ricezione e limitando l'impatto delle persone che si muovono nell'intorno del ricevitore.

2.4 Influenza degli echi corti sulla qualità di ricezione

L'influenza sulla ricezione DVB-T di un eco corto e profondo (di livello comparabile al segnale principale) è un importante elemento di valutazione nella ricezione indoor, in quanto l'antenna omnidirezionale non consente di discriminare tali echi; questi sembrano, infatti, essere la causa principale della cattiva ricezione in molti punti.

Un eco corto, in ricezione portatile, può essere causato dalla riflessione del raggio principale contro le pareti o le persone circostanti. Prove preliminari, effettuate in presenza di echi corti, hanno evidenziato una ricezione cattiva o addirittura impossibile anche con livelli dell'eco tali da non determinare una riduzione della potenza totale ricevuta al di sotto dell'ETL.

La Figura 8 mostra lo spettro del segnale COFDM ricevuto in un punto in cui, nonostante l'elevato livello della potenza in ingresso al ricevitore (circa -66 dBm), la ricezione non risulta possibile a causa della notevole alterazione subita dallo spettro del segnale.

Per analizzare il problema, è stato allestito in laboratorio un test-bed apposito nel quale l'eco corto è stato generato grazie ad una lunghezza adeguata del cavo. La ricezione è stata valutata in presenza di un eco di alto livello con ritardo di 0,05 ms, 0,1 ms e 0,2 ms e con un rapporto segnale principale/segnale interferente (C/I) di 0 dB; la fase relativa dell'eco è stata variata da 0° a 330° a passi di 30°. Inoltre è stata misurata la condizione in assenza di eco, per fornire un riferimento per il calcolo del margine di rumore (NML). I risultati sono riportati in Figura 9 in termini di NML

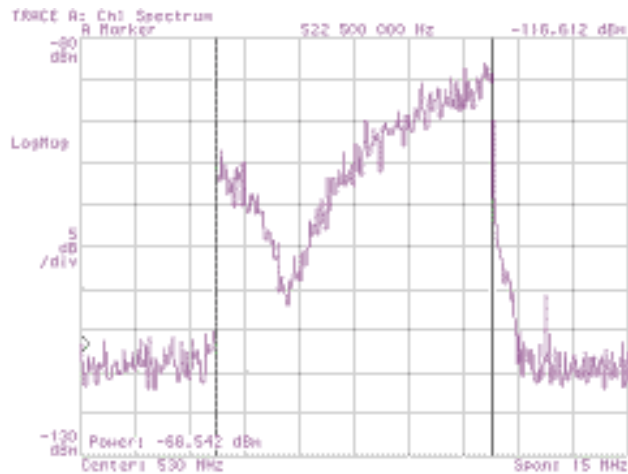


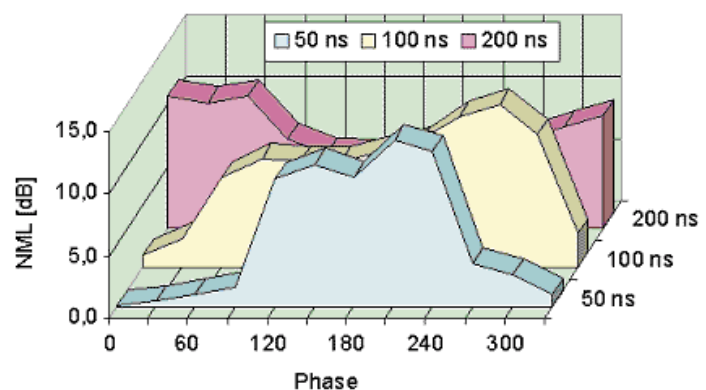
Fig. 8 - Spettro COFDM affetto da eco corto e profondo.

necessario nei vari casi per una corretta ricezione. E' chiara la relazione di proporzionalità inversa tra NML e qualità di ricezione, ossia con NML elevati è richiesto un C/N corrispondentemente più elevato rispetto al valore che caratterizza il sistema DVB-T in condizioni di ricezioni ideali.

Si osserva dai grafici di Figura 9 l'estrema variabilità della condizione di ricezione in funzione del ritardo e della fase dell'eco. Con un ritardo maggiore di 500 ns, non riportato in Figura 9, il NML è risultato di circa 7 ÷ 9 dB, valori sostanzialmente identici a quelli ottenuti nelle prove di laboratorio [10] Nota6 relative a ritardi dell'eco superiori a 500 ns. Con un ritardo inferiore a 500 ns, il NML dipende fortemente dalla fase dell'eco; il valore massimo del NML risulta superiore di 4-5 dB rispetto ai risultati ottenuti in [10]. Per verificare tali risultati e per

Nota 6.
Cfr. §2.2

Fig. 9 - Effetto degli echi corti sul margine di ricezione (risultati di laboratorio).



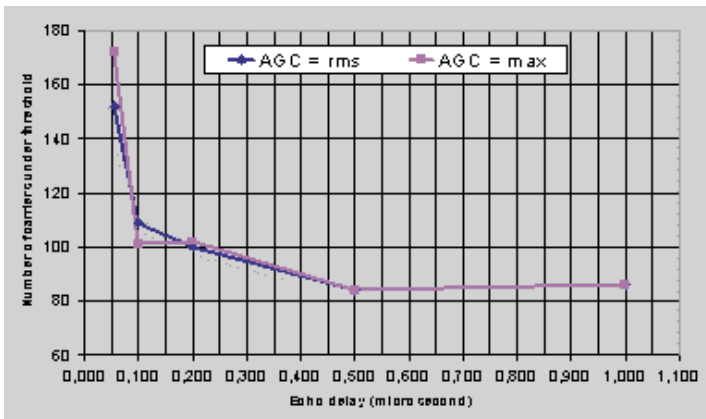


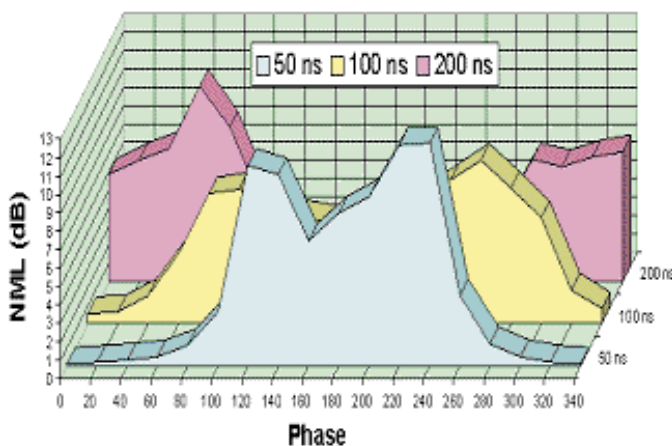
Fig. 10 - Numero di portanti COFDM sottosoglia.

comprendere l'origine dell'incremento del NML si è effettuata una simulazione al computer utilizzando il software TOPSIM-IV con modello Nota 7 di simulazione del segnale DVB-T.

Nota 7. Il modello di simulazione DVB-T, sviluppato da Rai-CRIT, è stato completamente validato in ambito al progetto europeo SPASE.

Fig. 11 - Effetto degli echi corti sul margine di ricezione (simulazione al computer).

Una prima simulazione è stata necessaria per capire se il numero di portanti dello spettro OFDM il cui livello, per effetto dell'eco corto, si trova al di sotto di una certa soglia, sia maggiore rispetto al caso di un eco più lungo di pari livello (C/I = 0dB), ovviamente contenuto all'interno dell'intervallo di guardia della configurazione DVB-T adottata (28µs nel caso 8K). Per verificare tale ipotesi si è effettuato il conteggio del numero di portanti OFDM il cui livello, per effetto dei buchi in frequenza, si trova al di sotto di una soglia arbitraria di 20 dB. Tale simulazione ha tenuto conto che il numero di portanti sotto-soglia dipende dalla fase dell'eco, perché parte dei buchi nello spettro può cadere al di fuori del canale; è



stato, dunque, considerato il valore massimo di portanti sotto soglia (fase peggiore). Nella simulazione sono stati utilizzati, inoltre, due tipi diversi di Automatic Gain Control (AGC): il primo basato sulla valutazione della potenza in banda del segnale (indicata in "rms"), e l'altro basato sul valore di picco ("max"). In Figura 10 sono illustrati i risultati di tale simulazione nei due casi.

Il numero di portanti del segnale COFDM sotto soglia cresce rapidamente in ragione inversa del ritardo dell'eco. Quando il ritardo supera 500 ns il numero di portanti tende a stabilizzarsi e risulta indipendente dalla fase. Sono state condotte ulteriori simulazioni, con valori di soglia diversi: il numero di portanti "sopresse" è ovviamente variato, ma l'andamento con il ritardo dell'eco è rimasto lo stesso.

Per valutare il NML generato dalle portanti sopresse per ciascun ritardo dell'eco, è stato simulato il sistema completo DVB-T variando la fase dell'eco con un intervallo di 20°. I risultati di tale simulazione sono riportati in Figura 11.

Dal confronto tra le Figura 9 e 11 si osserva una notevole corrispondenza fra i risultati delle prove di laboratorio e quelli ottenuti con simulazioni al computer, il che conferma l'attendibilità di queste valutazioni.

In conclusione, sulla base dei risultati delle prove di ricezione portatile indoor, delle misure di laboratorio e delle simulazioni al computer si trae l'indicazione che la presenza di echi corti di ampiezza elevata, che spesso s'incontrano nella ricezione "indoor" con antenna omidirezionale, comporta un incremento di 5 ÷ 6 dB del margine richiesto per una corretta ricezione (NML) rispetto al caso di echi lunghi, che spesso influenzano la ricezione "in aria", che è stata oggetto di precedenti valutazioni in laboratorio [10].

2.5 Sistema di Antenna Indoor a Diversity (IDA)

Le conclusioni a cui si è giunti nei paragrafi precedenti per la ricezione indoor mostrano che, qualora non si ottimizzi la posizione del-

l'antenna ricevente ad ogni cambio di sintonia, si può avere una copertura del servizio insufficiente anche quando il livello del campo e.m. è tale da poter garantire una buona ricezione in accordo con le previsioni EBU [4] ^{Nota8}. Tuttavia, quando saranno disponibili in area più canali DVB-T, sorgerà la necessità di un continuo aggiustamento della posizione dell'antenna durante lo "zapping" tra i vari canali ^{Nota9} per ottimizzare la ricezione.

Una possibile soluzione per recuperare il degradamento del margine di ricezione potrebbe essere quella di incrementare il valore di campo e.m. disponibile indoor utilizzando un gap-filler, come trattato in precedenza (paragrafo 2.2)

Un'altra contromisura, che non comporta l'aumento del campo e.m., è costituita dall'impiego di un sistema di ricezione con antenne multiple (due o più), ad esempio del tipo a "diversity spaziale", che ottimizza automaticamente la condizione di ricezione. Tale tecnica, ben nota e ampiamente applicata in sofisticati sistemi di telecomunicazione (collegamenti radio, stazioni radio-base della telefonia cellulare, comunicazioni militari, ecc.), è stata proposta anche per applicazioni di ricezione mobile DVB-T, per le quali è stato sviluppato un dispositivo sofisticato comprendente due antenne riceventi, un doppio tuner e doppio demodulatore COFDM [11], ed il relativo sistema di controllo.

E' stato dimostrato come tale tecnica, che richiede purtroppo sostanziali modifiche ai ricevitori commerciali, sia alquanto efficiente anche in modalità di trasmissione 8k ^{Nota10} ed in condizioni di elevata velocità del veicolo. Tuttavia, la complessità hardware del ricevitore e l'inevitabile incidenza sul costo potrebbe pregiudicare l'introduzione sul mercato di nuovi ricevitori DVB-T dotati di tale sistema "integrato", almeno nel breve periodo. Un approccio differente ^{Nota11}, più semplice e indirizzato specificamente verso la ricezione indoor, è stato sviluppato dal Centro Ricerche Rai (CRIT); esso utilizza due (o più) antenne riceventi e conserva invariata la struttura del ricevitore DVB-T esistente e può, a tutti gli ef-

fetti, essere considerato un accessorio economico per i ricevitori commerciali standard.

Descrizione del sistema IDA

Il principio di base del sistema IDA (Indoor Diversity Antenna) è il seguente: dato un sistema ricevente caratterizzato da una combinazione di più antenne fisiche elementari (N) poste fra loro ad una distanza ravvicinata (tipicamente dell'ordine di 1/8 della lunghezza d'onda, λ , della frequenza del canale r.f., o superiore), un circuito di controllo valuta la risposta spettrale in banda relativa a ciascuna antenna separatamente, individua quella caratterizzata dalla migliore condizione di ricezione ed invia automaticamente il corrispondente segnale all'ingresso del ricevitore DVB-T. Le varie antenne (o posizioni) sono individuate da un "contrassegno" che indica il grado di qualità del segnale ricevuto. Una soluzione equivalente può essere realizzata impiegando una singola antenna la cui posizione viene variata in modo continuo all'interno dell'area circostante il ricevitore.

La soluzione più semplice, dal punto di vista della complessità hardware, consiste nell'integrare all'interno del ricevitore DVB-T il sistema di analisi/decisione, e far sì che si ottenga l'informazione sulla qualità del segnale ricevuto (ad esempio BER, MER, esatta sincronizzazione ecc.) direttamente dal demodulatore COFDM. In tal caso, l'aggiunta a livello hardware consisterebbe semplicemente nel circuito di analisi/decisione e nell'antenna multipla (o singola mobile). Per contro, un sistema esterno e indipendente, ha il vantaggio di poter essere interconnesso a qualsiasi ricevitore disponibile sul mercato, fornendo una soluzione immediatamente applicabile. Naturalmente, in quest'ultimo caso, è necessario adottare nel modulo esterno un sistema di analisi più complesso per la valutazione della qualità del segnale ricevuto, in quanto tale risorsa non è più fornita direttamente dal ricevitore. Tale soluzione, che evita di ricorrere ad un ricevitore DVB-T di nuova generazione, richiede l'aggiunta di un sintonizzatore TV ed un semplice circuito analogico per la conversione del segnale r.f. a frequenza intermedia (IF). Rai-CRIT ha pro-

Nota 8.

I test di laboratorio hanno confermato i valori riportati sulle tabelle EBU per la ricezione portatile, nel caso in cui la posizione dell'antenna ricevente venga ottimizzata.

Nota 9.

Ovviamente ciò non accade nello zapping fra programmi appartenenti allo stesso bouquet poiché la frequenza di canale è la medesima; pertanto la risposta del canale non cambia.

Nota 10.

La configurazione 8K portanti OFDM non è di per sé ottima per la ricezione mobile in quanto la notevole durata del simbolo non consente di inseguire le variazioni rapide del campo e.m. La configurazione a 2K portanti consente di superare tale inconveniente, a scapito però di una maggiore vulnerabilità agli echi lontani presenti nelle reti SFN.

Nota 11.

Brevetto Rai-CRIT

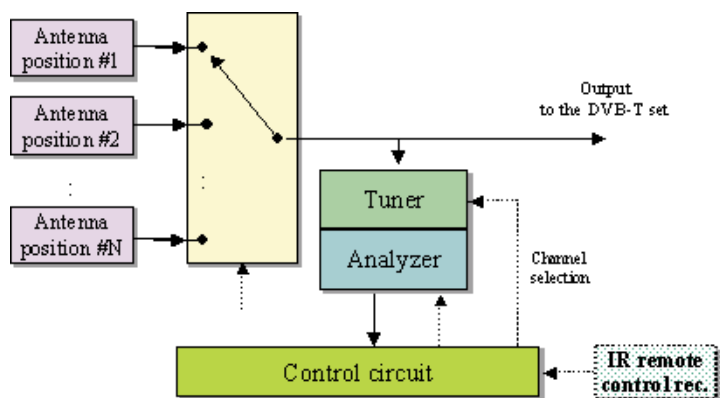


Fig. 12 - Schema a blocchi del sistema di ricezione a diversity spaziale (IDA).

gettato e realizzato un prototipo sperimentale di tale sistema IDA e ne ha successivamente verificate le prestazioni in una campagna di prove di ricezione indoor.

Il sistema prototipale è stato realizzato utilizzando $N=4$ antenne riceventi gestite da un apposito circuito di controllo, come si vede in Figura 12 che rappresenta lo schema a blocchi semplificato del dispositivo. L'algoritmo adottato effettua l'analisi del segnale ricevuto, convertito in IF, per mezzo di filtraggio e campionamento nel dominio della frequenza. L'analisi nel dominio della frequenza è effettuata su ciascuna di tre sottobande, in cui vie-

ne spezzato lo spettro del segnale COFDM, valutando il degradamento subito dalle portanti relative secondo i criteri illustrati nel paragrafo 2.4. (effetto degli echi corti e profondi, numero di portanti OFDM sotto soglia, ecc.). La decisione sul segnale da inviare al ricevitore DVB-T viene quindi presa dal confronto con le risposte relative alle quattro antenne.

La Figura 13 mostra il solido d'irradiazione del sistema di antenne prototipale alla frequenza centrale del canale 28 UHF (530 MHz) con uno solo degli elementi attivati. Da tale figura risulta evidente la caratteristica di direzionalità presentata dal sistema d'antenna.

L'algoritmo sviluppato via software nell'analizzatore e nel circuito di controllo costituisce il "cuore" del sistema IDA; il primo include un filtro sintonizzabile in tensione, seguito da un misuratore di potenza, mentre il secondo è implementato in un micro-controllore general-purpose, caratterizzato da un convertitore D/A e A/D a 8 bit integrato. La prevista introduzione di un telecomando permetterà al sistema di effettuare la selezione del canale nello stesso istante in cui il televisore riceve il comando di cambio sintonia dall'utente.

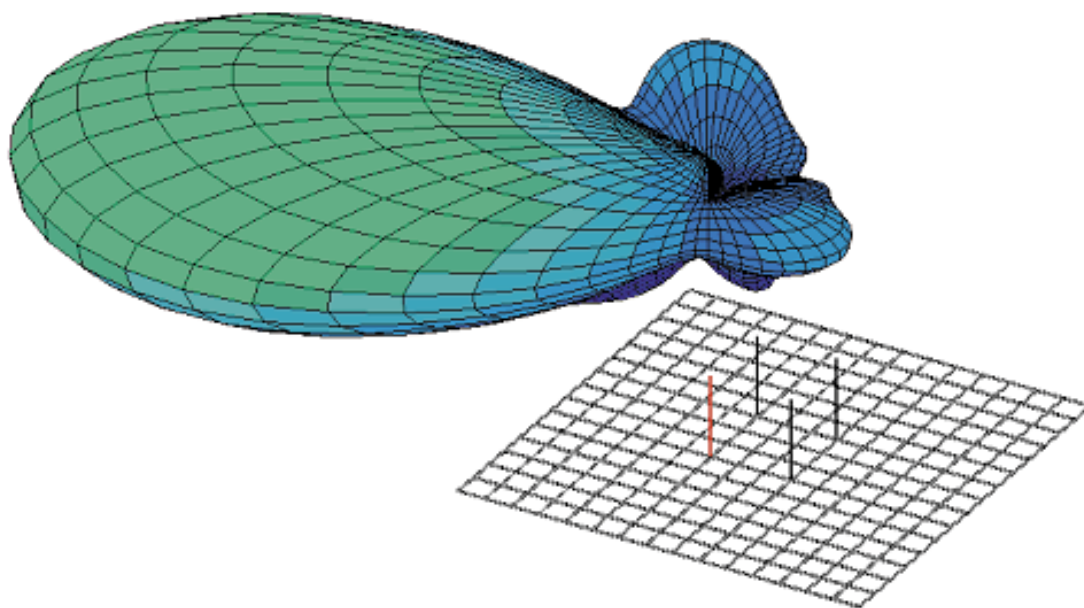


Fig. 13 - Sistema IDA: solido d'irradiazione alla frequenza $f = 530$ MHz.

Prestazioni del sistema IDA nella ricezione indoor

L'efficacia del sistema IDA nella versione prototipale è stata valutata tramite prove di campo all'interno dell'edificio di Rai-CRIT; le valutazioni sono state effettuate considerando aree quadrate di dimensioni 1.5x1.5m, caratterizzate ciascuna da una griglia di 25 posizioni di misura, analogamente a quanto già effettuato nel corso delle precedenti prove di campo per ricezione portatile indoor (vedi § 2.3).

Le valutazioni sono state effettuate in sei aree quadrate, situate in varie stanze dell'edificio, per un totale di 150 misure relative ciascuna a una micro-area di 25x25 cm. In ciascuna micro-area si sono valutati i vari parametri (BER, potenza del segnale, margine di ricezione, risposta spettrale) per poter stabilire la qualità di ricezione del segnale; successivamente è stato valutato e controllato il "contrassegno" assegnato dall' algoritmo a ciascuna delle micro-aree. A titolo di esempio sono riportate in Figura 14 quattro micro-aree con i relativi parametri; il contrassegno individua tre livelli di qualità di ricezione individuati con i colori: rosso=impossibile, giallo=critica, verde=buona.

L'attendibilità della stime effettuate dall'algoritmo è stata oggetto di verifiche sperimentali condotte nel corso delle prove di campo.

Il prototipo dell'IDA con N=4 antenne è in grado di scegliere tra quattro posizioni dell'antenna, e quindi ciascuna di esse ne ha a disposizione altre tre in cui potersi spostare. Dunque, ciascuna delle 25 posizioni di ogni superficie quadrata è stata presa in esame unitamente alle sue tre adiacenti, e il calcolo statistico della probabilità di copertura è stato effettuato a partire dal contrassegno, in colore, fornito dall'algoritmo delle quattro micro-aree secondo il criterio sopraindicato.

I risultati sono riportati in Tabella 4 da cui risulta evidente il sensibile miglioramento apportato dal sistema IDA che consente una probabilità

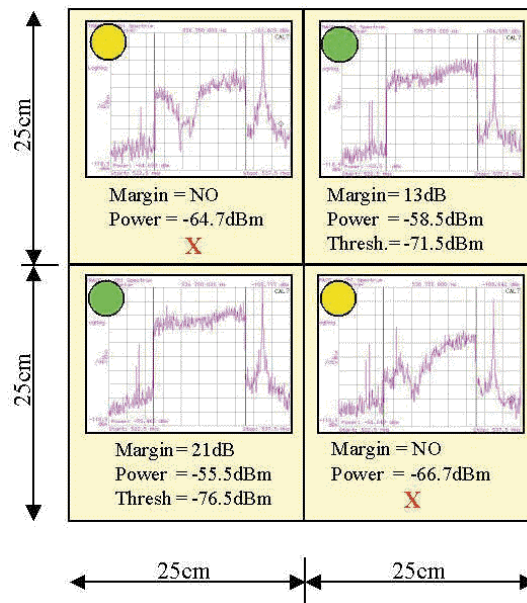


Fig. 14 - Esempio di test su quattro posizioni adiacenti.

di copertura del 100% pressoché su tutte le aree dell'edificio.

Si noti che in Tabella 4 la copertura percentuale si riferisce ai contrassegni "giallo" e "verde".

Un ulteriore beneficio apportato dal sistema di ricezione a diversity spaziale IDA si riscontra nella fase di "zapping" ossia di ricerca della sintonia su un nuovo canale r.f. Come si è visto al § 2.1. con una semplice antenna ricevente omnidirezionale è necessario, in generale, riposizionare l'antenna per la migliore condizione di ricezione ad ogni cambio di canale r.f. Nel caso di più canali DVB-T (che saranno disponibili nella fase di regime del servizio) la probabilità di corretta ricezione senza ripo-

Tab. 4 - Risultati sulla probabilità di copertura.

TEST#	No-IDA Coverage	IDA coverage	Coverage Improvement
Square1	80%	100%	20%
Square2	96%	100%	4%
Square3	68%	100%	32%
Square4	100%	100%	0%
Square5	60%	92%	32%
Square6	88%	100%	12%

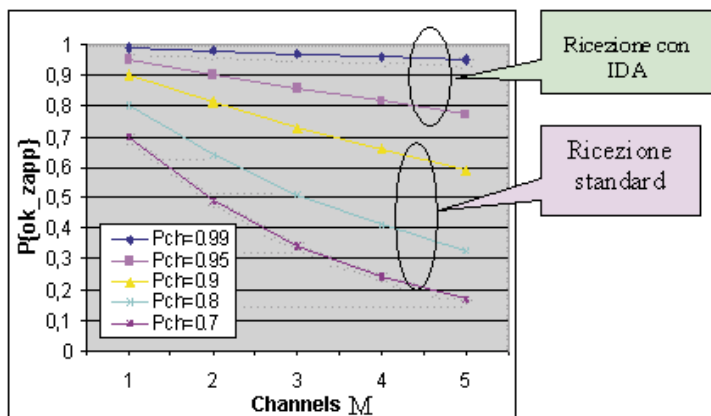


Fig. 15 - Probabilità di corretta ricezione, dopo lo zapping.

sizionare l'antenna (P{ok_zapp}), durante lo "zapping" tra i diversi bouquet di programmi, si riduce notevolmente.

Definiamo tale probabilità come:

$$P\{ok_zapp\} = P_{ch.1} \cdot P_{ch.2} \cdot \dots \cdot P_{ch.M} = \prod_{i=1}^M P_{ch.i}$$

dove $P_{ch.1}, \dots, P_{ch.M}$ rappresentano la probabilità di corretta ricezione per ciascun canale senza riposizionamento dell'antenna.

E' possibile osservare che P{ok_zapp} diminuisce rapidamente anche per bassi valori di M, se le probabilità di corretta ricezione dei singoli canali r.f. sono basse.

Per esempio, se le probabilità di copertura sono uguali per tutti i canali r.f., vale a dire $P_{ch.i} = P_{cov}$, allora:

$$P\{ok_zapp\} = \prod_{i=1}^M P_{ch.i} = P_{cov}^M$$

L'andamento della probabilità P{ok_zapp} di corretta ricezione dopo lo zapping, e senza riposizionamento dell'antenna ricevente,

decrece esponenzialmente con il crescere del numero di canali (M), come indicato in Figura 15.

Come si può osservare dalla Figura 15, nel caso di M=3 canali r.f. disponibili in area – come si prospetta in Italia nella fase di lancio della DVB-T – ed assumendo una probabilità di copertura $P_{cov}=0.8$, vicina a quanto ricavato nelle prove di campo, ci si dovrebbe attendere di dover riposizionare l'antenna ricevente per il 50% delle operazioni di zapping fra i tre canali.

Con il sistema IDA invece – grazie alla maggiore copertura consentita - è possibile aumentare sensibilmente la probabilità di corretta ricezione dopo lo zapping P{ok_zapp}. Assumendo una probabilità di copertura $P_{cov}=0.95$, secondo le indicazioni fornite dalle prove di campo, è possibile raggiungere una probabilità P{ok_zapp} pari a circa l'85%; di conseguenza verrebbe limitata al 15% dei casi la necessità di riposizionare l'antenna ricevente.

3. Conclusioni

E' stata effettuata una prima campagna di prove tecniche per valutare la qualità di ricezione del segnale DVB-T (nella configurazione 64QAM, rate 2/3) all'interno dell'edificio del Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della RAI. Sono state globalmente effettuate 140 misure su due piani dell'edificio nelle seguenti condizioni:

- ♦ ricezione diretta con antenna omnidirezionale (a baffo)
- ♦ impiego di un rice-trasmittitore isofrequenziale (gap-filler), installato al 2° piano dell'edificio, e ricezione con antenna omnidirezionale
- ♦ impiego di un sistema di ricezione a diversità di spazio (sistema IDA).

La ricezione diretta con antenna direttiva posizionata a circa 10 m a.g.l., effettuata all'inizio della campagna, ha consentito di verificare la

buona qualità di ricezione fuori dell'edificio; si è riscontrato un margine di ricezione alla soglia di errore (QEF) di circa 35 dB, in sostanziale accordo con le previsioni di campo.

Le prove di ricezione indoor hanno consentito di pervenire alle seguenti conclusioni:

- ◆ La ricezione portatile con antenna a "baffo" – previa ottimizzazione manuale della posizione dell'antenna – è risultata possibile in circa l'85% dei casi.
- ◆ La qualità di ricezione è sensibilmente influenzata dalla presenza di persone / oggetti in movimento nelle vicinanze dell'antenna ricevente.
- ◆ In generale, l'antenna deve essere riposizionata ogni qual volta si cambi canale r.f.
- ◆ Le infrastrutture in muratura dell'edificio introducono una attenuazione del livello del campo e.m. ricevuto (Building Penetration Loss, BPL) dell'ordine di 7 dB (al secondo piano) e 4,6 dB (al 1° piano).
- ◆ L'utilizzo di un gap-filler a bassa potenza (2mW) garantisce una ricezione portatile indoor in tutto l'edificio (100%), previa ottimizzazione della posizione dell'antenna ricevente. La presenza di persone in movimento intorno al ricevitore riduce la copertura del servizio all'80% circa.
- ◆ La presenza di echi corti e profondi (di livello comparabile con il segnale principale), essenzialmente dovuti alle riflessioni dell'ambiente circostante, possono degradare sensibilmente la qualità di ricezione. Misure di laboratorio e simulazioni al calcolatore hanno dimostrato che un eco corto e profondo provoca una riduzione del margine di rumore (NML) dell'ordine di $7 \div 9$ dB.

◆ In via teorica, l'utilizzo di una schiera di 20 gap-filler da 2mW (per reirradiare ciascuno un canale r.f. DVB-T) risulta compatibile con i limiti di esposizione ai campi elettromagnetici stabiliti dalla legislazione vigente, a condizione che venga rispettata una zona di guardia intorno all'antenna trasmittente. In Italia, per rispettare i limiti previsti, tale zona non dovrebbe essere inferiore a 0.50 metri.

◆ L'utilizzo di un'antenna ricevente a diversity spaziale di nuova concezione (IDA) si è dimostrata molto efficace permettendo di migliorare le prestazioni della ricezione portatile indoor, innalzando la probabilità di copertura al 100% dell'edificio.

Bibliografia

1. M. Cominetti, A. Morello, R. Serafini: "Prospettive per l'introduzione della televisione digitale terrestre in Italia". *Elettronica e Telecomunicazioni*, n°3 dicembre 1999.
2. P. B. Forni, S. Ripamonti, V. Sardella: "Sperimentazione pre-operativa DVB-T in area di servizio". *Elettronica e Telecomunicazioni*, n°1 gennaio 2002.
3. European Conference of Postal and Telecommunication Administrations: "The Chester 1997 multilateral coordination agreement relating to technical criteria, coordination principles and procedures for the introduction of Terrestrial Digital Video Broadcasting (DVB-T)"; Chester Conference 1995.
4. European Broadcasting Union: "Terrestrial Digital Television planning and implementation considerations"; BNP 005 Second Issue, 1997.
5. B. Wergeland, S. Bergsmark: "Report on indoor field strength", Teracom R&D department; Spring 1997.

6. ICNIRP: "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300GHz)", 1996.
7. CEENELEC ENV 50166-2: "Human exposure to electromagnetic fields", High frequency (10kHz-100GHz)", November 1994.
8. CEI 111-3 (ENV 50166-2): "Esposizione umana ai campi elettromagnetici", Alta frequenza (10kHz-100GHz), May 1995.
9. Decreto Legge n.381 del 10/9/98,
10. A. Bertella, B. Sacco, M. Tabone: "Valutazioni in laboratorio del sistema DVB-T per la televisione digitale terrestre". Elettronica e Telecomunicazioni, n°1 gennaio 2002.
11. E. Launay, J. Hammerschmidt, J. Rinne – "Antenna diversity technique for mobile and portable receivers", IBC99, Amsterdam.