



## Valutazione dei fattori di rischio indisponibilità nell'uso della rete radio GSM-R per applicazioni ferroviarie italiane ad alta velocità/alta capacità (AV/AC)

Dott. Ingg. Luca GIUGNO<sup>(\*)</sup>, Marco LUISE<sup>(\*\*)</sup>, Enzo BAGAGLI<sup>(\*\*\*)</sup>, Mario GIANNINI<sup>(\*\*\*\*)</sup>, Fabio SENESI<sup>(\*\*\*\*\*)</sup>, Raffaele MALANGONE<sup>(\*\*\*\*\*)</sup>, Daniele CARONTI<sup>(\*\*\*\*\*)</sup>

**SOMMARIO** – Lo scopo principale di questo articolo è quello di stabilire la successione delle attività di analisi e simulazione da eseguire al fine di effettuare una valutazione preliminare dei fattori di rischio indisponibilità nell'uso della rete radio GSM-R per applicazioni ferroviarie italiane ad alta velocità / alta capacità (AV/AC). Più in dettaglio, la rete wireless GSM-R è tipicamente impiegata sia per le comunicazioni terra/bordo che per le operazioni di segnalamento nella rete ferroviaria AV/AC di RFI S.p.A, in accordo alle specifiche europee ERTMS/ETCS di Livello 2. Nel corso del lavoro sono quindi delineate nell'ordine le attività di base necessarie alla valutazione dei suddetti fattori di rischio indisponibilità, con particolare enfasi su quelli provocati dall'effetto delle interferenze radio extra-sistema nella banda di frequenze impiegata dal sistema GSM-R. Sebbene questo documento riporti esplicitamente il processo delle attività di analisi del rischio effettuate su due *case-study* costituiti dalle tratte ferroviarie AV/AC Roma-Napoli (RO-NA) e Torino-Novara (TO-NO) di recente attivazione da parte di RFI, la metodologia qui mostrata ha validità del tutto generale e può essere ri-applicata a qualsiasi tratta ferroviaria AV/AC di futura realizzazione e messa in opera, come ad esempio la Milano-Bologna (MI-BO). A conferma della validità dell'approccio presentato, si riportano infine, a titolo di esempio, i risultati di adeguate campagne di test effettuate da terzi nel caso della tratta TO-NO, i quali mostrano un buon grado di corrispondenza con quelli ottenuti nello stesso scenario nel corso dello studio qui presentato.

### 1. Il progetto AV/AC in Italia ed il sistema GSM-R

Le nuove linee ad Alta Velocità (AV) italiane sono progettate da RFI per potenziare e modernizzare la ferrovia italiana, al fine di migliorare ed ampliare il servizio offerto al pubblico su scala nazionale e locale. L'obiettivo principale è quello di trasformare il sistema ferroviario italiano in un sistema ad alta capacità (AC), adibito sia al trasporto passeggeri che a quello delle merci, che consenta la circolazione di un numero di treni quasi doppio rispetto a quello attuale con velocità di punta a 300 km/h in condi-

zioni di massima sicurezza, grazie anche all'ampliamento strutturale della rete ferroviaria lungo le direttrici più frequentate, al miglioramento funzionale degli itinerari tradizionali. Inoltre, la loro realizzazione in linea con i piani comunitari di sviluppo di una rete ferroviaria europea interoperabile AV, permetterà di valorizzare la centralità, l'accessibilità e l'integrazione europea del territorio italiano e del suo sistema produttivo e logistico. Il sistema AV/AC italiano conterà di circa 1.250 km di binari disposti lungo gli assi ferroviari italiani più frequentati attraverso la trasversale Torino-Venezia, la dorsale Milano-Napoli e quindi lungo i collegamenti con il nord Europa, attraverso i valichi alpini, e con il sud Italia, tra Napoli, Bari e Reggio Calabria fino a Palermo, come si può notare dalla fig. 1.

Dal punto di vista delle principali innovazioni tecnologiche apportate dal progetto AV/AC alle linee ferroviarie preesistenti, vale la pena menzionare l'adozione dell'ERTMS/ETCS (European Railway Management System/European Train Control System) [6], [26], cioè del nuovo sistema di comando, controllo e distanziamento

<sup>(\*)</sup> Wiser S.r.l. – Wireless Systems Engineering and Research.  
<sup>(\*\*)</sup> Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università di Pisa.

<sup>(\*\*\*)</sup> Intecs S.p.A., Polo di Attività Montacchiello, Pisa.

<sup>(\*\*\*\*)</sup> RFI S.p.A., Roma.

dei treni ideato a livello europeo, basato sul sistema wireless cellulare GSM-R (GSM for Railway) [15] in cui i segnali trasmessi da terra vengono recepiti dalle apparecchiature di bordo e tradotti in istruzioni di circolazione, distanziamento tra i convogli e frenata. Il sistema GSM-R presenta le stesse caratteristiche tecniche del GSM pub-



Fig. 1 - Il progetto AV/AC in Italia.

blico, essendo strutturato come un sistema GSM “convenzionale” che utilizza delle particolari bande di frequenze riservate alle applicazioni ferroviarie. La copertura del territorio è limitata alla zona in cui è presente il tracciato ferroviario, per cui la forma delle celle è sviluppata in lunghezza e sfrutta antenne direttive per la copertura radio. Come si nota dalla fig.2, il GSM-R opera nelle bande di frequenza comprese tra:

- 876-880 MHz per le comunicazioni dal treno verso terra (uplink);
- 921-925 MHz per le comunicazioni da terra verso il treno (downlink)

e l'accesso al mezzo di trasmissione è di tipo misto FDMA/TDMA (Frequency / Time Division Multiple Access).

I principali requisiti a cui deve sottostare il sistema GSM-R per applicazioni ferroviarie, individuati nel corso del progetto EIRENE (European Integrated Railway Radio Enhanced Network) [5] e divisi in requisiti di rete fissa (prestazioni di copertura, handover e selezione di cella, tempo di connessione, ritardi di trasmissione e probabilità di errore etc.) e requisiti del terminale mobile (fisici,

meccanici, di compatibilità elettromagnetica etc.), sono riportati in [10], [20]. A titolo di esempio, dal punto di vista della probabilità di copertura radio GSM-R lungo la tratta, devono essere soddisfatti i seguenti valori:

- probabilità di copertura del 95% con un livello di copertura di 38.5 dB  $\mu$ V/m (-98 dBm) per applicazioni vocali e dati non critici per la sicurezza;
- probabilità di copertura del 95% con un livello di copertura di 41.5 dB  $\mu$ V/m (-95 dBm) su linee con velocità minori o uguali a 220 km/h.

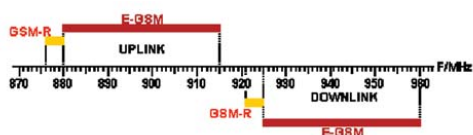


Fig. 2 - Bande di frequenze allocate per i sistemi GSM-R.

## 2. Motivazioni delle attività di analisi del rischio indisponibilità

Stanti i requisiti di massima e l'architettura generale della rete GSM-R menzionati nel paragrafo precedente, emerge chiara la necessità di svolgere un'attività di analisi del rischio indisponibilità della rete wireless GSM-R quando essa è impiegata per applicazioni critiche riguardo il controllo del traffico, il segnalamento e, più in generale, le comunicazioni terra/treno di tipo voce/dati.

Nel seguito si delinearanno quindi in maniera dettagliata i passi da svolgere durante tale attività di analisi del rischio indisponibilità, la quale richiederà approcci basati sia su tecniche specifiche di tipo analitico che su simulazione al computer. L'attenzione sarà rivolta principalmente alla valutazione dell'effetto sia delle sorgenti radio di interferenza che delle cause di indisponibilità di tipo extra-sistema, al fine di evidenziare la presenza di zone non sufficientemente coperte dal segnale GSM-R o di altre situazioni critiche dal punto di vista propagativo lungo la tratta ferroviaria AV/AC prescelta.

Sebbene questo documento riporti esplicitamente i principali risultati delle attività di analisi del rischio denominate GRASS (GSM-R Risk Assessment) [11] e GRASS-II [12], svolte da RFI in collaborazione con Intecs S.p.a. ed il Laboratorio DSPCOLA (DSP for COMMUNICATION LABORATORY) del Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa, rispettivamente sulle tratte ferroviarie AV/AC di recente attivazione Roma-Napoli (RO-NA) e Torino-Novara (TO-NO), la metodologia qui di seguito indicata ha validità del tutto generale e può essere ri-applicata a qualsiasi tratta ferroviaria ad alta velocità di futura messa in opera, come ad esempio la tratta AV/AC Milano-Bologna (MI-BO).

### 3. Procedura di valutazione dei fattori di rischio indisponibilità

L'attività di valutazione dei fattori di rischio indisponibilità nell'uso della rete cellulare GSM-R lungo una particolare tratta ferroviaria AV/AC può essere suddivisa nelle seguenti:

- Fase 1 – Analisi delle caratteristiche della tratta prescelta;
- Fase 2 – Localizzazione e modellizzazione delle sorgenti di interferenza/indisponibilità del sistema radio GSM-R;
- Fase 3 – Individuazione dei “punti critici” sul tracciato ferroviario;
- Fase 4 – Individuazione di possibili contromisure alla degradazione delle prestazioni della rete GSM-R;

descritte in dettaglio qui di seguito.

In particolare, la Fase 1 consiste nell'analisi delle caratteristiche della tratta ferroviaria in esame cioè:

- il numero, la posizione, le coordinate, le caratteristiche fisiche, tecniche ed operative delle BTS (Base Transmitter Station) del sistema GSM-R;
- le gallerie, gli edifici tecnologici, i binari e le interconnessioni con le linee ferroviarie tradizionali;
- i ripetitori GSM-R per la copertura delle gallerie e delle vie di fuga;
- lo schema dei collegamenti principali tra gli apparati di terra;
- nelle aree in prossimità della tratta di interesse, il numero, la posizione, le caratteristiche fisiche, tecniche ed operative delle stazioni BTS dei vari operatori GSM, delle stazioni TV e radio pubbliche e private, dei RADAR aeroportuali civili e militari per il controllo del traffico aereo.

In particolare, le informazioni di cui all'ultimo punto possono essere fornite, previa esplicita richiesta, dal Ministero delle Comunicazioni della Repubblica Italiana.

Successivamente alla Fase 1, relativa allo studio delle caratteristiche della linea ferroviaria prescelta, nella Fase 2 si passa alla localizzazione e modellizzazione analitica delle possibili: i) sorgenti di interferenza di tipo elettromagnetico nella banda GSM-R; ii) cause di indisponibilità della rete radio, come ad esempio:

- handover lungo la tratta;
- fenomeni di Doppler shift e Doppler spread dovuti al moto del treno lungo la tratta;

- interferenze radio extra sistema causate da:
  - sistema cellulare E-GSM;
  - stazioni emittenti TV;
  - stazioni emittenti radio;
  - RADAR aeroportuali civili/militari;
- attenuazione del segnale causata da fenomeni meteorologici;
- propagazione in gallerie ferroviarie;
- attenuazione del segnale dovuto a propagazione per cammini multipli (*fading da multipath*).

La Fase 3 è incentrata sull'individuazione dei cosiddetti “punti critici” dal punto di vista radio propagativo

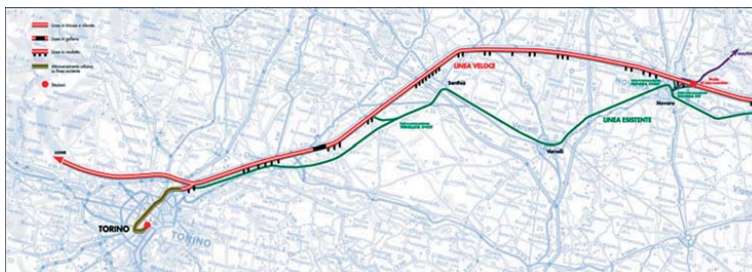


Fig. 3 - La sottotratta Torino-Novara della tratta AV/AC Torino-Milano.

lungo la tratta ferroviaria in esame. Per “punto critico” si intende una particolare area della tratta caratterizzata da: i) basso livello del segnale utile (i.e., campo elettromagnetico) prodotto dalle BTS GSM-R, a causa ad esempio di avverse condizioni orografiche o di propagazione; ii) basso livello di rapporto segnale/interferenza (Carrier to Interference - C/I) dovuto ad emissioni indesiderate di livelli di potenza non trascurabili nella banda delle trasmissioni GSM-R da parte di stazioni radio trasmettenti estranee al sistema radio ferroviario (extra-sistema), come, ad esempio, i dispositivi RADAR di ausilio al traffico aereo, le radio FM, i trasmettitori E-GSM e quelli TV. I punti critici vengono valutati per simulazione mediante specifici algoritmi di predizione del segnale utile GSM-R (che saranno dettagliati in futuro) o per analisi puntuale dei livelli di campo misurati lungo la tratta. Queste valutazioni sono combinate con i risultati di algoritmi che valutano il livello di interferenza radio nella banda dello stesso segnale utile sulla base dei modelli statistici implementati nella Fase 2 e tenendo specificatamente in conto il numero, la posizione e le caratteristiche fisiche di tutti i trasmettitori radio (TV, E-GSM, RADAR), situati nei dintorni della tratta in esame ed indicati dal Ministero delle Comunicazioni durante le attività previste nella Fase 1.

Una volta stabilita la presenza di eventuali punti critici del collegamento radio lungo il tracciato ferroviario, nella Fase 4 si tratta di individuare possibili (eventuali)

TABELLA 1  
ELENCO BTS SULLA TRATTA AV/AC TO-NO

Sito	Progressiva chilometrica [km+m]	Frequenza Portante [MHz]
1	1+740	923.4
2	5+765	923.8
3	9+712	924.8
4	13+739	922.6
5	17+575	921.8
6	21+463	924.4
6bis	23+325	923.0
7	25+679	922.4
8	29+700	923.8
9	34+571	921.2
10	38+647	924.8
11	41+956	924.4
12	48+231	923.6
13	53+700	922.0
14	59+130	921.6
15	62+394	923.0
16	66+106	924.2
17	69+989	924.8
18	71+998	922.4
19	75+997	923.6
20	79+950	922.8
21	84+085	922.0

contromisure necessarie a migliorare la qualità del servizio (Quality of Service - QoS) del sistema GSM-R in termini di livello di copertura, rapporto segnale/interferenze in ingresso al ricevitore a bordo treno e disponibilità del sistema stesso. Dette contromisure devono essere ricercate nell'ambito delle tecniche MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) per sistemi di comunicazione wireless, quali ad esempio il multiplexing spaziale [8], la trasmissione in diversità [22], [23], la ricezione in diversità (di tempo, di frequenza, di angolo, di spazio e di polarizzazione) [17], ed infine le smart antennas (SA) [2], [3]. Ovviamente, l'adozione di una particolare contromisura, in una zona particolarmente svantaggiata riguardo l'affidabilità e la qualità del servizio, deve essere valutata tenendo specificatamente conto dei costi derivanti da nuove installazioni a bordo e/o a terra.

**4. Applicazione della procedura: il caso della tratta AV/AC TO-NO**

In questa sezione si riportano i risultati dell'applicazione della procedura su esposta per

la valutazione dei fattori di rischio indisponibilità nel caso di studio della tratta ferroviaria AV/AC Torino-Novara (TO-NO), evidenziando le azioni principali che sono state svolte nell'ambito delle quattro diverse fasi dettagliate nella sezione precedente.

**Fase 1 – Tratta AV/AC TO-NO: analisi della tratta**

La tratta AV/AC TO-NO, che si sviluppa per circa 85 km, è entrata in funzione il 10 Febbraio 2006, in concomitanza con le Olimpiadi invernali. La piattaforma GSM-R è implementata dalla progressiva chilometrica 1+740 a quella 84+085 km circa. L'elenco delle 22 BTS, comprensivo della relativa progressiva chilometrica e del valore della frequenza portante in uso è riportato in tabella 1, mentre la disposizione sul territorio delle stesse è visibile in fig. 4.

A titolo di esempio, in fig. 5 è riportata una parte dei risultati delle misure effettuate da Sirti [19] sul livello del campo elettromagnetico ricevuto (RXLev), espresso in dBm, lungo lo spezzone di linea ferroviaria compreso tra la BTS 7 e la BTS 8 della tratta TO-NO, all'aumentare della distanza dalla BTS 7. In particolare, il grafico riporta oltre ai livelli dei campi generati dalle BTS della coppia 7-8, quelli della BTS precedente e successiva alla suddetta coppia (6bis e 9, rispettivamente). Per ogni sito riportato in fig.5 sono indicati anche i valori delle rispettive portanti GSM-R, espresse in MHz. Dall'analisi di tutti i livelli dei campi elettromagnetici relativi ad ogni coppia di BTS oggetto della misura (non riportati per limitazioni di spazio) si può notare come essi siano di gran lunga superiori alla prima soglia critica del valore minimo del campo elettromagnetico riportata in [20], [10] e pari a -95 dBm, garantendo il soddisfacimento delle specifiche EIRENE sul livello di copertura della rete GSM-R.

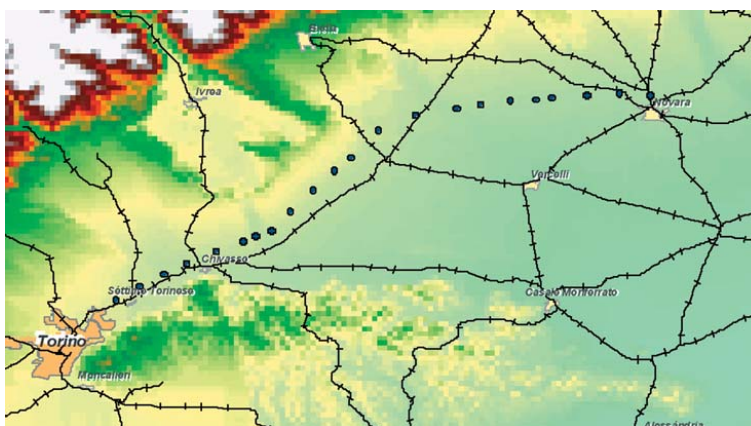


Fig. 4 - Dislocazione delle BTS GSM-R della tratta AV/AC TO-NO.

In aggiunta alle BTS GSM-R della tratta TO-NO, in fig. 6 sono riportate, sulla base dei dati forniti dal Ministero delle Comunicazioni, sia le BTS del sistema E-GSM situa-

con la modellizzazione analitica delle stesse. Qui di seguito sono passate in rassegna le problematiche affrontate, sulla base dell'elenco già delineato nel par. 3.

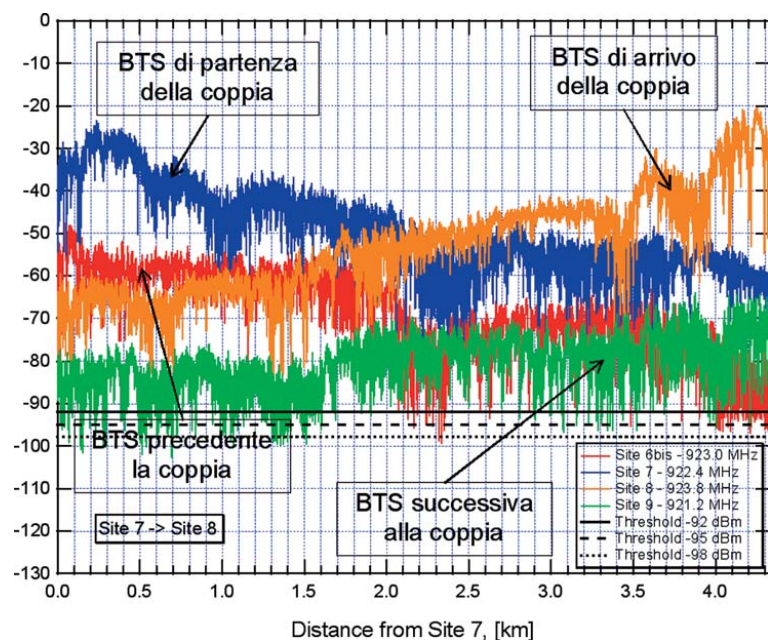


Fig. 5 - Andamento del livello di campo misurato tra i siti 7 e 8 della tratta AV/AC TO-NO.

te in Piemonte ed in Lombardia (in viola quelle riferite al sistema ED50 ed in giallo quelle riferite al Roma40), operanti a frequenza pari a 900 MHz o 1800 MHz (GSM Dual Band), che le stazioni trasmettenti TV (in rosso) nella stessa zona. Ad esempio, nel caso dei trasmettitori TV nei dintorni della tratta TO-NO, sono disponibili le coordinate e le principali caratteristiche trasmissive di 3802 trasmettitori di tipo analogico e di 547 trasmettitori di tipo digitale terrestre (DVB-T).

**Fase 2 - Tratta AV/AC TO-NO: localizzazione e modellizzazione delle fonti di interferenza/indisponibilità**

Preso atto della configurazione della rete GSM-R lungo la tratta AV/AC TO-NO, dei risultati delle misure del livello di campo elettromagnetico irradiato dalle BTS della stessa rete nei dintorni della tratta ferroviaria, e dei database forniti dal Ministero delle Comunicazioni relativamente ai trasmettitori radio presenti nella zona oggetto di studio, la Fase 2 della procedura qui riportata vede dapprima l'individuazione sia delle possibili sorgenti di interferenza di tipo elettromagnetico nella banda GSM-R che delle cause di eventuale indisponibilità del sistema, per poi concludere

*Handover*

Dopo la modellizzazione completa delle tipologie e delle modalità di handover (HO) nella rete GSM, si è osservato che tutti gli HO della tratta TO-NO sono di tipo intra-BSC (Base Station Controller) sincroni e di tipo interno, quindi gestiti completamente dall'unico BSC responsabile di tutte le BTS presenti. È stato calcolato che la frequenza degli HO lungo la tratta TO-NO è molto elevata (uno ogni 48 secondi a 300 km/h). Risultati presenti in letteratura mostrano che molte delle indisponibilità complessive lungo la tratta sono dovute alla procedura di HO, che può rendersi critica a causa della circolazione del treno ad elevata velocità. Un'opportuna contromisura a questa fonte di rischio indisponibilità è indicata nella Fase 4.

*Doppler shift e Doppler spread*

Prima di descrivere in dettaglio le attività svolte nell'ambito di questa sotto-sezione, occorre fornire una definizione univoca di Doppler shift e di Doppler spread. Il primo indica lo scostamento (in Hz) del valore della frequenza portante del segnale GSM-R ricevuto rispetto a quello della frequenza a cui è stato effettivamente trasmesso, causato del moto relativo a velocità *v* tra trasmettitore e ricevitore GSM-R. Considerando un treno che si muove ad una velocità massima di oltre 300 km/h (83.3 m/s) ed una trasmissione ad una frequenza portante di circa 925 MHz (massimo valore della frequenza portante per il downlink) si ottiene che il massimo Doppler shift, espresso da

$$f_d = f_c \cdot \frac{v}{c} \cdot \cos(\alpha) \tag{1}$$

è in valore assoluto uguale a 257 Hz, dove  $\alpha$  è l'angolo compreso tra l'orizzontale e la congiungente delle antenne di trasmissione e ricezione (fig. 7 per maggiori dettagli) e *c* è la velocità della luce nel vuoto pari a circa  $2.9979 \cdot 10^8$  m/sec. Se si considera invece il caso della portante GSM-R a frequenza minima (876.2 MHz), si ottiene per il Doppler Shift un valore di 243 Hz.

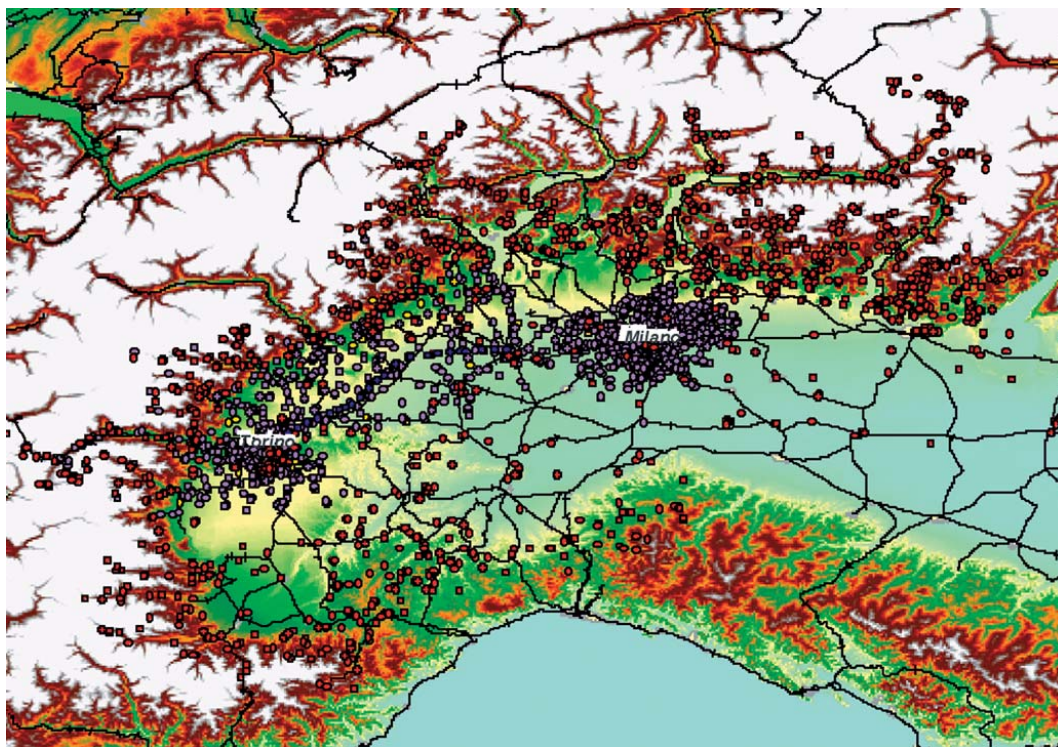


Fig. 6 - Stazioni radio interferenti nei pressi della tratta AV/AC TO-NO.

Per quanto riguarda il fenomeno del Doppler spread, sottolineiamo che a causa della propagazione del segnale GSM-R per cammini multipli (multipath) attraverso i diversi ostacoli (edifici, montagne, alberi etc) presenti nella tratta compresa tra trasmettitore e ricevitore, arrivano al ricevitore stesso diverse copie del segnale utile trasmesso tra loro ritardate, attenuate e sfasate in modo casuale. Ognuna di esse proviene da una direzione differente nello spazio, essendo dovuta alla riflessione e diffusione del segnale nell'ambiente circostante. Ne consegue che, poiché ognuna di esse subisce un diverso Doppler shift pari al massimo a 257 Hz, il massimo Doppler spread lungo la tratta è pari a 2 volte il massimo Doppler shift (circa 514 Hz). Il segnale ricevuto presenterà quindi un allargamento di banda di un fattore, che viene detto banda Doppler, pari al Doppler spread. Analogamente al caso dell'handover, un'opportuno accorgimento da tenere in conto per ridurre l'impatto di questo fattore di rischio indisponibilità sarà indicato nella Fase 4.

#### *Interferenze da sistema E-GSM*

In questa sotto-attività, è stato analizzato in dettaglio il livello di interferenza dovuto alle stazioni del GSM pub-

blico ed esteso (E-GSM) presenti nella zona circostante al tracciato AV/AC TO-NO. Ai fini dell'analisi è stato utilizzato il database fornito dal Ministero delle Comunicazioni che contiene informazioni riguardanti le stazioni GSM 900 e DCS 1800 (GSM Dual Band) nei dintorni della tratta prescelta. Inoltre, è stata presentata una procedura da seguire per il calcolo dei livelli di interferenza radio lungo la tratta causati da tutti i trasmettitori E-GSM e DCS sul segnale GSM-R. Tale procedura è stata implementata via SW nella Fase 3, ed ha permesso di calcolare i rapporti segnale/interferenza  $(C/I)_{E-GSM}$  lungo la tratta TO-NO, dove  $C$  rappresenta la potenza del segnale utile GSM-R ed  $I$  è la potenza del segnale interferente E-GSM nella banda utile, cioè i 200 kHz allocati ad ogni canale ferroviario.

#### *Interferenze da trasmettitori TV*

Analogamente a quanto effettuato per le interferenze da canali E-GSM, in questa sotto-sezione è stato studiato l'effetto delle interferenze dovute alle emissioni fuori banda da parte delle stazioni televisive sul sistema GSM-R. E' possibile infatti che i trasmettitori TV interferiscano sul segnale ferroviario a causa di emissioni indeside-

rate di potenza oltre i limiti di banda nominalmente allottati al servizio broadcast televisivo. Ciò si verifica soprattutto nella banda GSM-R che si estende da 876 a 880 MHz (uplink), essendo questa più vicina al limite superiore della banda TV UHF-V. Nella banda GSM-R di downlink, che si estende da 921 a 925 MHz, l'effetto delle armoniche e delle emissioni spurie dei trasmettitori TV è attenuato in quanto la distanza in frequenza tra le porzioni di spettro allottate ai due distinti servizi è aumentata di 45 MHz rispetto al caso dell'uplink. Le interferenze prodotte dai segnali televisivi sono state catalogate come interferenze a banda larga (rispetto al segnale utile che ha una banda di 200 kHz) e di tipo continuo. Per la valutazione della loro entità, è stato utilizzato un database

da del segnale utilizzato nella rete wireless GSM-R è trascurabile, in quanto la separazione in frequenza tra lo spettro del segnale GSM-R e quelli dei segnali generati dai dispositivi/sistemi qui citati è maggiore persino di quella che intercorre tra GSM-R e TACAN e quindi sufficientemente ampia per ritenere nullo l'effetto interferente.

*Interferenze da radio FM*

Poiché la massima frequenza allottata a questo servizio (108 MHz) dista circa 768 MHz dalla minima frequenza utilizzata dal sistema GSM-R (876 MHz), è stato ritenuto totalmente ininfluenza l'effetto delle interferenze prodotte dal sistema radio FM su quello utilizzato a scopi di comunicazione e segnalamento ferroviario.

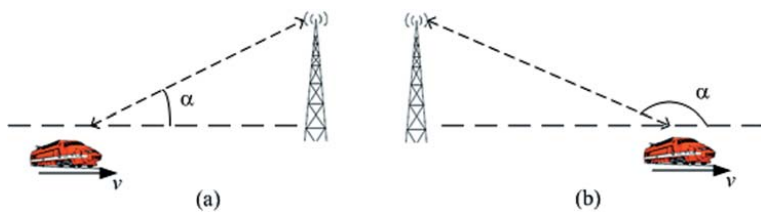


Fig. 7 - Doppler shift positivo (a), e negativo (b).

fornito dal Ministero delle Comunicazioni contenente le principali informazioni riguardanti le antenne per trasmissioni TV installate nella zona circostante al tracciato AV/AC TO-NO. Inoltre, come nel caso delle interferenze causate da stazioni GSM pubbliche, è stata presentata una procedura da seguire per il calcolo del rapporto segnale/interferenza causato da tutti i trasmettitori TV sul segnale GSM-R lungo la tratta. Questa procedura, implementata esaustivamente via SW al fine di valutare il livello di interferenza TV in termini di rapporto  $(C/I)_{TV}$ , verrà mostrata in dettaglio nella Fase 3.

*Interferenze da RADAR*

Riguardo le possibili interferenze da RADAR, è stato preso in considerazione l'effetto dell'interferenza causata sul segnale GSM-R da diversi sistemi di radio-navigazione per aerei quali VOR/DME, TACAN, NDB ed ILS presenti negli aeroporti, nelle scuole di volo e nelle aviosuperfici poste nei dintorni della tratta AV/AC TO-NO. Essendo i segnali GSM-R e quelli TACAN abbastanza distanti in frequenza (almeno 37.2 MHz se il RADAR trasmette alla minima frequenza pari a 962 MHz), è stato appurato che le potenze interferenti trovate sulla banda del segnale GSM-R sono di fatto trascurabili. Inoltre, sia per i dispositivi di ausilio alla radionavigazione diversi dal TACAN, quali NDB, ILS, VOR/DME, che per quelli utilizzati nelle scuole di volo analizzate nel caso della tratta AV/AC TO-NO, il problema delle interferenze elettromagnetiche nella ban-

*Propagazione in galleria*

Lungo la tratta AV/AC TO-NO, sono presenti sia alcune gallerie che alcune cosiddette "nicchie artificiali", predisposte per contenere elementi del sottosistema TLC Terra-Treno, il quale si compone della rete

GSM-R e degli estensori cellulari. La prima galleria che si incontra lungo il tracciato ferroviario è la galleria Rondissone, a partire dalla progressiva chilometrica 21+585 (in direzione Novara) fino alla progressiva 23+274 e quindi lunga complessivamente 1689 m. Continuando lungo la linea ferroviaria, si incontra una serie di 5 gallerie brevi che si sviluppano a partire dalla progressiva chilometrica 70+426 fino a quella 71+400, tra i siti 17 (km 69+989) e 18 (km 71+998). Per soddisfare le specifiche EIRENE e garantire un livello adeguato di segnale GSM-R, in entrambe le gallerie su citate sono stati posti o cavi fessurati per il prosieguo del campo elettromagnetico o antenne *phased array* collegate ad amplificatori in galleria. Dopo aver verificato i dati sperimentali relativi all'andamento del campo misurato su tutta la tratta TO-NO ed in particolare in corrispondenza delle due gallerie di cui sopra, è stato possibile concludere che il livello di segnale GSM-R in galleria non presenta andamenti particolarmente critici o al di sotto delle specifiche richieste.

*Fading per propagazione su canale multipath*

A causa della propagazione in ambiente rurale e con velocità del ricevitore a bordo treno superiore a 250 km/h, è stato selezionato il modello di canale multipath RA250 (Rural Area 250) per la propagazione lungo la tratta TO-NO. Noto il massimo Doppler shift lungo la tratta (257 Hz a 300 km/h) e calcolati il tempo di coerenza di questo canale (4 ms) e la banda Doppler (514 Hz), essendo pari a

3.69  $\mu$ s la durata di un simbolo da trasmettere e quindi molto minore del tempo di coerenza del canale, si conclude che questo canale è affetto da fenomeni di affievolimento (*fading*) di tipo lento, contrastabile con le convenzionali tecniche di equalizzazione di canale adattativa mediante midambolo, impiegate correntemente anche nel sistema GSM pubblico.

*Attenuazione da fenomeni atmosferici*

In questa sotto-sezione è stata calcolata l'attenuazione in dB/km dovuta all'intensità di pioggia che viene superata in media per lo 0.01% dell'anno, sia nelle regioni Europee che in quelle dell'Italia Settentrionale, e quindi anche nei dintorni della tratta AV/AC TO-NO, seguendo le specifiche

“critico” se: i) il livello del segnale utile trasmesso dalle BTS GSM-R e ricevuto lungo la linea è considerevolmente basso o al di sotto delle specifiche EIRENE di rete; ii) il punto è caratterizzato da un basso valore del rapporto segnale/interferenza (*C/I*) a causa delle emissioni indesiderate da parte di trasmettitori interferenti nella banda utile GSM-R.

Per effettuare una valutazione secondo il punto i), è possibile ricorrere ad un duplice approccio. Nel primo caso, si analizzano nei vari punti del tracciato ferroviario i livelli di campo elettromagnetico ricevuto (RXLev) e rilevati lungo linea mediante un'opportuna campagna di misurazione (si veda ad esempio quanto riportato nella fig. 5). In alternativa, si può ricorrere all'implementazione SW di specifici modelli presenti in letteratura per effettuare la predizione del campo elettromagnetico, come ad esempio quelli riportati in [21], che verranno descritti in seguito.

Invece, nel caso ii), si è fatto ricorso all'implementazione SW di un programma di simulazione per la valutazione del livello di interferenza radio causato da trasmettitori extra-sistema in funzione nella banda di frequenze del segnale utile GSM-R, secondo un algoritmo che verrà descritto nella sezione successiva.

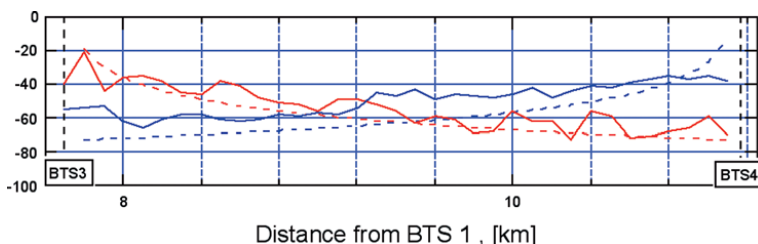


Fig. 8 - Confronto tra il campo elettromagnetico predetto (linee tratteggiate) e quello misurato da SIRTI (linee continue) lungo la tratta AV/AC TO-NO.

linee guida delineate nella raccomandazione ITU-R P. 837-4 [16]. Dato l'esiguo valore riscontrato (minore di 0.001 dB/km), è stato appurato che l'attenuazione del segnale per fenomeni atmosferici quali pioggia non crea problemi di fuori servizio nel sistema GSM-R.

**Fase 3 – Tratta AV/AC TO-NO: individuazione dei punti critici**

Come già accennato nella sezione precedente, la Fase 3 della procedura di valutazione dei fattori di rischio indisponibilità è incentrata sull'individuazione dei “punti critici” dal punto di vista della propagazione radio del segnale GSM-R lungo la tratta TO-NO. Un punto del tracciato ferroviario può essere considerato

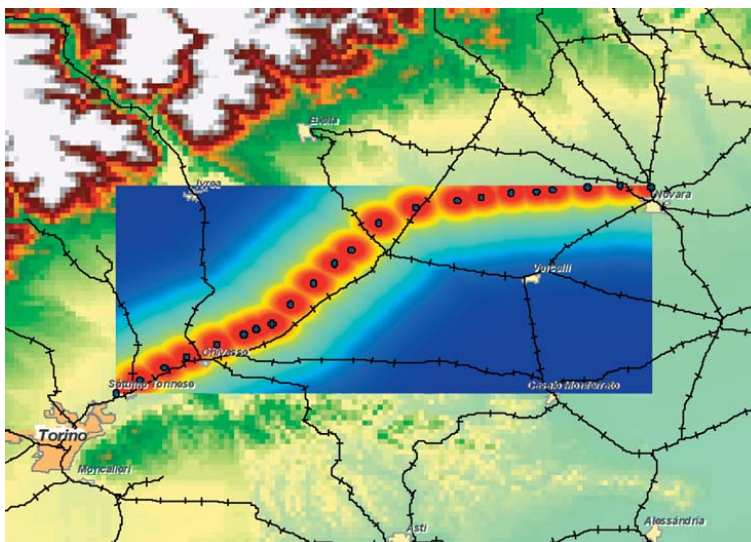


Fig. 9 - Predizione del livello di campo elettromagnetico nei pressi della tratta AV/AC TO-NO.

Predizione del campo elettromagnetico lungo la tratta AV/AC TO-NO

In fig. 8 è riportato, a titolo di esempio, il livello di campo elettromagnetico predetto nella sotto-tratta della linea TO-NO compresa tra la BTS 3 e la BTS 4 in funzione della distanza  $d$  dalla BTS 1. Come si può notare, i valori calcolati mediante l'applicazione del modello di predizione del campo elettromagnetico Hata COST231 [Sta01] sono in buon accordo con quelli misurati da Sirti lungo la tratta. In particolare, il valore del livello di campo predetto risulta peggiorativo rispetto ai valori ottenuti come risultato delle misurazioni lungo linea.

Nella fig. 9 si riporta invece l'andamento 2D del campo elettromagnetico predetto lungo tutta la tratta ferroviaria secondo il modello Hata COST231, per mezzo di un SW sviluppato specificatamente in linguaggio C dagli autori. I risultati, visualizzati con l'ausilio del SW GIS ArcGis, sottolineano come le zone caratterizzate dal colore rosso nei dintorni delle BTS GSM-R della tratta TO-NO siano quelle che presentano valori di campo maggiori, i quali diminuiscono all'aumentare della distanza  $d$  dalle stesse BTS.

Calcolo del rapporto segnale/interferenza (C/I) lungo la tratta AV/AC TO-NO

Al fine di valutare la potenza emessa fuori banda dalle stazioni E-GSM nel SW prodotto, scritto in linguaggio C dagli autori, sono state utilizzate le maschere di emissione di potenza specificate dall'ETSI in [GSM05.05] e riportate in fig. 10. Tali maschere specificano i massimi valori

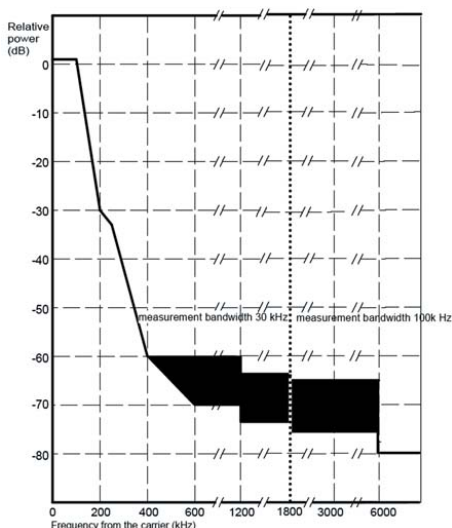


Fig. 10 - Maschera di emissione per BTS GSM 900.

permessi delle emissioni fuori banda espresse in dB, in funzione dell'offset di frequenza della stazione emittente (interferente) rispetto alla portante GSM-R.

Fissato quindi un punto generico lungo la tratta, sono state utilizzate le suddette maschere per calcolare, per ogni stazione E-GSM presente nel database ministeriale, i contributi di potenza interferente e di rapporto segnale/interferenza (C/I) nel punto considerato. Per ottenere la potenza effettivamente interferente al ricevitore GSM-R, precisamente nei canali broadcast che servono il mobile nel punto di studio, è stato utilizzato il modello di radio propagazione in spazio libero essendo questo peggiorativo rispetto a qualunque altro modello di attenuazione che tenga conto dell'eventuale presenza di ostacoli. Ciò detto, la potenza interferente ricevuta è stata quindi valutata come

$$P_r = I = EIRP \cdot \left(\frac{c}{4\pi d}\right)^2 \cdot \frac{1}{f^2} \quad (2)$$

dove  $d$  indica la distanza tra le stazioni base E-GSM ed il ricevitore mobile, mentre la frequenza  $f$  si assume pari a quella delle portanti interferite. Il valore di  $EIRP$  (Effective Isotropic Radiated Power) utilizzato in (2) considera soltanto la potenza emessa fuori banda nel canale GSM-R interferito, e può essere quindi scritto come

$$EIRP = P_i \cdot G_i \quad (3)$$

dove con  $P_i$  si è indicata la potenza emessa fuori banda dalla stazione radio base (calcolata con l'uso delle maschere) e con  $G_i$  il guadagno di antenna espresso in dBi.

Per valutare quindi il rapporto  $(C/I)_{E-GSM-TOT}$  totale dovuto all'interferenza provocata da trasmettitori E-GSM in uno specifico punto della tratta, i valori dei  $(C/I)_{E-GSM}$  di tutte le varie stazioni GSM calcolati nello stesso punto devono poi essere sommati tra di loro secondo la seguente formula:

$$(C/I)_{E-GSM-TOT} = \left[ \left(\frac{C}{I_1}\right)_{E-GSM}^{-1} + \left(\frac{C}{I_2}\right)_{E-GSM}^{-1} + \dots + \left(\frac{C}{I_n}\right)_{E-GSM}^{-1} \right]^{-1} \quad (4)$$

Il calcolo è ripetuto quindi in maniera esaustiva in ogni punto della tratta con passo pari a 100 m.

In fig. 11 si riporta un esempio di valori calcolati di  $(C/I)_{E-GSM-TOT}$  ogni 100 m lungo la linea TO-NO dalla BTS numero 2 sino alla BTS 3. I livelli di rapporto campo  $(C/I)$  visualizzati sono relativi ai siti 1, 2, 3 e 4. Mettiamo in evidenza che, seppur non riportato per questioni di spazio, il livello del rapporto segnale/interferenza  $(C/I)_{E-GSM-TOT}$ , ottenuto considerando i segnali generati dalla BTS di partenza e da quella di arrivo per ogni coppia di BTS consecutive, non risulta mai inferiore al valore di 13 dB. Questo valore permette quindi di effettuare gli handover di BTS, nel passaggio da una cella GSM-R alla successiva, con una probabilità di successo secondo le specifiche riportate in [20].

Analogamente al caso dei trasmettitori E-GSM, nel caso di interferenza da trasmettitori TV, fissato un punto lungo la tratta, sono state utilizzate sia le informazioni contenute nel Decreto Legge numero 311 del 9 marzo 1994 che stabilisce le norme per l'omologazione dei trasmettitori di radiodiffusione televisiva che i diagrammi d'irradiazione dei trasmettitori contenuti nel database ministeriale al fine di calcolare, per ogni stazione TV presente nel database stesso, i contributi di potenza interferente e di rapporto segnale/interferenza  $(C/I)_{TV}$  nel punto considerato.

La potenza TV irradiata fuori banda da un singolo trasmettitore può essere espressa da

$$P_{ir} = I = \frac{EIRP}{G_M} \cdot G_r \cdot \left(\frac{c}{4\pi d}\right)^2 \cdot \frac{1}{f^2} \quad (5)$$

dove con  $G_M$  e  $G_r$  si sono intesi rispettivamente il guadagno d'antenna trasmittente e ricevente nella direzione di massima irradiazione.

Questo calcolo deve essere ripetuto per tutte le stazioni TV presenti nel Database.

I vari valori di  $(C/I)_{TV}$  di tutte le singole stazioni TV così ottenuti devono poi essere sommati secondo la formula:

$$(C/I)_{TV-TOT} = \left[ \left(\frac{C}{I_1}\right)^{-1} + \left(\frac{C}{I_2}\right)^{-1} + \dots + \left(\frac{C}{I_n}\right)^{-1} \right]^{-1} \quad (6)$$

dove i singoli termini si intendono in scala lineare ed il calcolo è ripetuto in ogni punto della tratta con passo pari a 100 m.

Nella fig. 12 si riportano a titolo di esempio i valori di  $(C/I)_{TV-TOT}$  ottenuti per la coppia di BTS 2-3 sia per trasmissioni TV in polarizzazione orizzontale che verticale. Per ogni sottotratta analizzata (non riportata per problemi di spazio), il livello del rapporto segnale/interferenza  $(C/I)_{TV-TOT}$  ottenuto non scende mai al di sotto di 10 dB, garantendo un corretto funzionamento del ricevitore GSM-R in ogni punto della tratta AV/AC TO-NO.

In conclusione, dall'analisi dei risultati ottenuti con l'ausilio delle procedure qui indicate, si sottolinea che lungo la tratta TO-NO non sono stati individuati punti particolarmente critici dal punto di vista radio-propagativo. Il livello di rapporto segnale/interferenza dovuto ai trasmettitori E-GSM è risultato sempre maggiore di 13 dB, a fronte di una specifica fissata ad una soglia critica pari a -9 dB per le interferenze da canale adiacente (ACI - Adjacent Channel Interference) e pari a 9 dB per quelle co-canale (CCI - Co-Channel Interference). Il livello di rapporto segnale/interferenza derivante da trasmissioni TV in polarizzazione sia orizzontale che verticale è sempre maggiore di 10 dB lungo la tratta, e quindi sufficiente per garantire una buona rivelazione del segnale GSM-R e lo svolgimento delle procedure di handover non critiche.

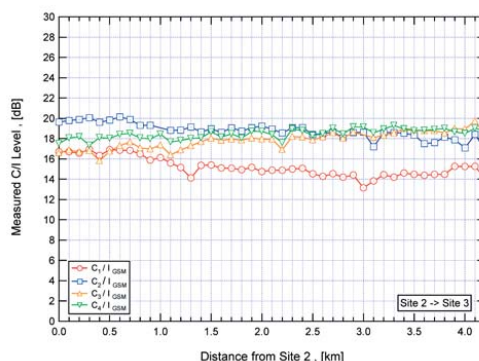


Fig. 11 -  $(C/I)_{E-GSM-TOT}$ : tratto compreso tra la BTS 2 e la BTS 3.

#### Fase 4 - Tratta AV/AC TO-NO: Individuazione delle possibili contromisure

Sulla base delle possibili sorgenti di interferenza extra-sistema individuate nella Fase 2 e dei risultati di simulazione riportati nella Fase 3, nella Fase 4 dello studio effettuato sulla tratta TO-NO sono state suggerite alcune contromisure volte da un lato a ridurre: i) l'eventuale indisponibilità (Outage) del sistema GSM-R potenzialmente causata dagli handover lungo la tratta; ii) il fenomeno dagli affievolimenti del segnale utile a causa della propagazione dello stesso per cammini multipli (fading dovuto a multipath), e dall'altro a migliorare le prestazioni complessive del GSM-R stesso.

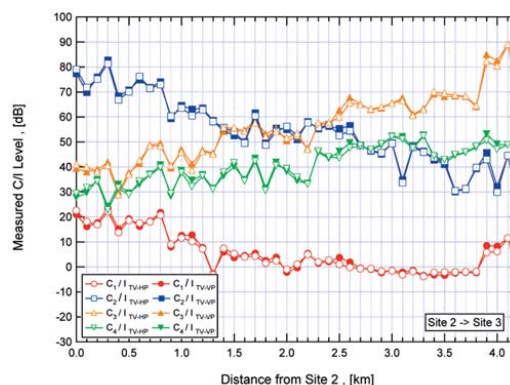


Fig. 12 -  $(C/I)_{TV-TOT}$ : tratto compreso tra la BTS 2 e la BTS 3.

Queste contromisure si basano sull'applicazione delle cosiddette tecniche MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) [4] basate su antenne multiple. Tradizionalmente, le

antenne multiple sono state impiegate per *incrementare la diversità* dei singoli percorsi seguiti dal segnale utile al fine di contrastare i fenomeni di fading dovuti al canale di propagazione. Ogni coppia di antenne di trasmissione e ricezione crea un diverso percorso del segnale che si propaga dal trasmettitore verso il ricevitore. Inviando segnali che trasportano la stessa informazione attraverso differenti cammini, possono quindi essere ricevute diverse repliche dei dati trasmessi, le quali sono affette da fenomeni di fading che sono indipendenti da un ramo all'altro.

Il concetto di *diversità* può essere ottenuto per esempio utilizzando antenne multiple in ricezione, ottenendo in un sistema SIMO (Single-Input Multiple-Output) due effetti congiunti. Il primo di essi è il cosiddetto *array gain*, che consiste nell'innalzamento del rapporto segnale-rumore (Signal-to-Noise Ratio o *SNR*) dovuto alla combinazione coerente dei segnali ricevuti che causa una riduzione della potenza media del rumore termico in ingresso al ricevitore anche in assenza di fading. Il secondo è il cosiddetto *diversity gain*, dovuto alla combinazione dei segnali ricevuti che rappresentano delle repliche, affette da processi di fading tra loro indipendenti, dell'unico segnale utile trasmesso.

Se, in aggiunta alle antenne multiple in ricezione, vengono considerate anche antenne multiple in trasmissione si crea quindi un sistema MIMO di tipo, dove ed rappresentano rispettivamente il numero di antenne di trasmissione e ricezione.

Le tecniche MIMO possono essere tassonomicamente divise in.

1. *Multiplexing Spaziale (SM)*;
2. *Tecniche di trasmissione in diversità (TD)* quali:
  - a. Space Time Trellis Code (STTC);
  - b. Space Time Block Code (STBC);
3. *Tecniche di ricezione in diversità (RD)* quali:
  - a. Ricezione in diversità temporale (RD-T);
  - b. Ricezione in diversità frequenziale (RD-F);
  - c. Ricezione in diversità angolare (RD-A);
  - d. Ricezione in diversità spaziale (RD-S);
  - e. Ricezione in diversità di polarizzazione (RD-P);
4. *Smart Antennas (SA)* come:
  - a. Smart Antennas con Adaptive Array (SA-AA);
  - b. Smart Antennas Switched Beam (SA-SB);
5. *Tecniche Ibride (H)* come:
  - a. Space Time Block Coding con Adaptive Array (STBC-AA);

le cui caratteristiche fondamentali verranno brevemente descritte nelle sotto-sezioni successive.

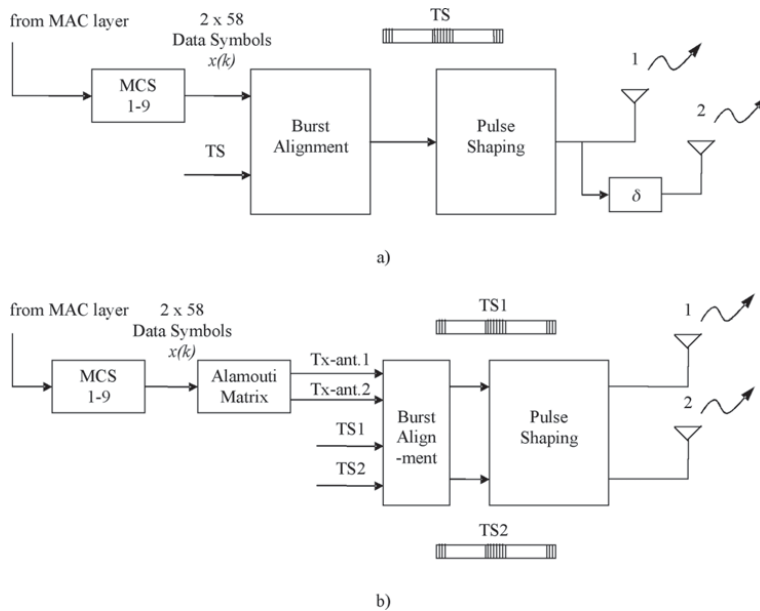
#### *Multiplexing Spaziale (SM)*

Sebbene nella letteratura specialistica sia presente una grande varietà di validi contributi tecnici relativamente all'adozione delle tecniche di multiplexing spaziale ai sistemi cellulari, occorre precisare che l'uso di tecniche quali BLAST, V-BLAST, D-BLAST [8], [9] è applicabile solamente a sistemi di terza generazione (3G) quali l'UMTS in Europa, il CDMA2000 negli Stati Uniti ed il W-CDMA in Giappone. Infatti detti sistemi si avvalgono del concetto di *macrodiversità*, cioè della possibilità di fornire o ricevere un servizio utilizzando più di un collegamento radio per lo stesso utente, non implementato nel caso di trasmissioni ferroviarie basate su GSM-R.

#### *Tecniche di trasmissione in diversità (TD)*

L'applicazione di antenne multiple in trasmissione nei sistemi di comunicazione wireless ha recentemente guadagnato molto successo. Se escludiamo il caso dell'architettura BLAST proposta da FOSCHINI [8], [9], in cui sono utilizzate antenne multiple in trasmissione ed in ricezione per ottenere maggiori throughput di traffico dati, gli *space-time trellis codes* (STTC) [22] e gli *space-time block codes* (STBC) [23] sono stati e sono tuttora oggetto di intense attività di ricerca. Come già accennato nelle sezioni precedenti, gli STTC e gli STBC sfruttano la diversità spaziale al fine di ottenere diversity gain e/o code gain (dovuto all'adozione di codici a protezione dell'informazione dagli errori), e quindi, di riflesso, una migliore QoS rispetto a quella ottenibile con sistemi a singola antenna. Con gli STTC e gli STBC le antenne multiple in ricezione sono opzionali. La diversità spaziale deriva dal fatto che i percorsi seguiti dal segnale nella propagazione dalle antenne di trasmissione all'antenna di ricezione (singola o multipla) sono soggetti a processi di fading tra loro indipendenti, e quindi la probabilità che ogni percorso sia degradato nello stesso istante di osservazione è significativamente minore della probabilità che un singolo percorso del segnale sia soggetto a fenomeni di *deep fade*, cioè di affievolimento profondo.

L'applicazione degli STTC e STBC nei futuri sistemi di comunicazione wireless promette quindi trasmissioni affidabili ad alta velocità. In genere, mentre in downlink un singolo utente o MS (Mobile Station) richiede di effettuare il download di una grossa quantità di dati da una BTS, in uplink il traffico necessario per richiedere l'inizio delle operazioni di download è tipicamente modesto. A tal proposito, al fine di favorire le trasmissioni in downlink, cioè da una BTS verso una MS, l'applicazione dei STTC e STBC è molto appetibile a causa della condizione opzionale di presenza di antenne multiple in ricezione, cosa non sempre realizzabile a causa delle piccole dimensioni della MS. Ciò si mappa quindi nella necessità di equipaggiare solo le BTS con antenne aggiuntive.



- temporale (RD-T);
- frequenziale (RD-F);
- angolare (RD-A);
- spaziale (RD-S);
- di polarizzazione (RD-P).

Tra queste, le più comuni sono sicuramente le RD-S, che prevedono in ricezione l'impiego di due o più elementi radianti, in genere identici tra loro e posti ad una certa distanza l'uno dall'altro. Un concetto che sta alla base della ricezione in diversità consiste nel fatto che la probabilità di avere su entrambi i canali di comunicazione, relativi alle due antenne in ricezione, una profonda attenuazione del segnale in ingresso è ovviamente minore rispetto al caso di ricezione convenzionale con singola antenna. Gli studi incentrati sulla ricezione in diversità spaziale mirano alla ricerca della distanza necessaria a "scorrelare" i segnali in ingresso alle due antenne (a quindi ad individuare la distanza a cui devono essere dis-

Fig. 13 - Struttura del trasmettitore GSM con doppia antenna e diversità del ritardo a), con STBC b).

Un esempio di struttura di trasmettitore GSM con doppia antenna è riportato in fig. 13.a, mentre un esempio che implementa un codice STBC con due antenne in trasmissione (il cosiddetto *codice di Alamouti*) [1] è visibile in fig. 13.b.

*Tecniche di ricezione in diversità (RD)*

Le tecniche di ricezione in diversità sono comunemente impiegate in diversi sistemi di comunicazione wireless. Esse consistono sostanzialmente nella ricezione di alcune copie del segnale proveniente da cammini diversi, tipicamente indipendenti tra di loro, ciascuno dei quali è elaborato da specifici *rami* o *branches* del ricevitore. Quest'ultimo provvede poi ad elaborare e combinare le uscite dei suddetti rami secondo opportune strategie. L'impiego di tecniche di ricezione in diversità si rende necessario per contrastare le degradazioni sulla qualità del segnale trasmesso causate ad esempio da fenomeni di attenuazione dovuti a fading in canali multipath, dai ritardi con cui i segnali arrivano al ricevitore a causa del multipath, dai fenomeni di interferenza co-canale (CCI) e, più in generale, di tipo extra-sistema. Nei sistemi di radiocomunicazione odierni possono essere impiegate svariate tecniche di ricezione in diversità. Dal punto di vista della classificazione, esse possono essere suddivise in tecniche di diversità:

sposte fisicamente le antenne di ricezione), compatibilmente con la dimensione del sistema. Ovviamente la separazione nello spazio dipende dall'angolo con cui il segnale perviene all'antenna al ricevitore. Nei terminali mobili come i ricevitori cellulari GSM-R, i quali sono generalmente circondati da altri oggetti, è sufficiente una spaziatura delle antenne uguale a  $\lambda/4$ , essendo l'apertura angolare tipicamente pari a  $360^\circ$ . I nuovi progetti per antenne integrate rendono possibile l'utilizzo della diversità spaziale anche per terminali mobili. La fig. 14 riporta un esempio di progetto di terminale mobile per sistemi cellulari equipaggiato con una doppia antenna.

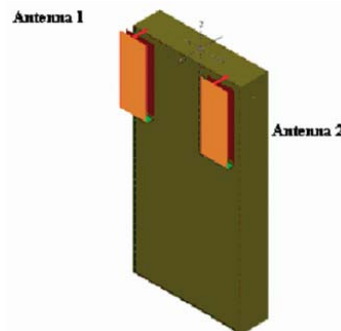


Fig. 14 - Esempio di diversità spaziale di un terminale mobile.

Smart Antennas (SA)

I moderni sistemi di telefonia cellulare utilizzano una settorizzazione delle antenne alle BTS pari a 120°, ovvero ogni BTS impiega un apparato d'antenna per ogni settore, separato dagli altri e che spazia con l'irradiazione 120°, con ricezione in diversità in ognuno di essi. Dal momento che ogni settore dell'antenna trasmette su frequenze differenti al fine di ridurre l'interferenza CCI, si rendono necessari degli handover tra i diversi settori. Se si impiegassero settori con una minore apertura angolare le prestazioni sarebbero migliori a spese però di un maggior numero richiesto di handover [25].

Queste considerazioni giustificano il trend corrente di impiego di *smart antenna* o SA (letteralmente, "antenne intelligenti") [2], [3] negli apparati di rete dei correnti e futuri standard di telefonia cellulare. Il principio su cui si fondano le SA consiste, invece di trasmettere informazioni su un intero settore, di dirigere il fascio dalla BTS verso la mobile station desiderata. A tale scopo, possono essere impiegate diverse strategie di trasmissione in downlink, ognuna caratterizzata da differenti implicazioni sulla complessità e sull'architettura del sistema. Queste strategie possono essere raggruppate in due grandi categorie: quella in cui il fascio può essere selezionato tra un set di fasci predefiniti, puntati su direzioni fisse, e quella in cui il fascio può essere guidato direttamente verso la mobile station, per mezzo di algoritmi di elaborazione del segnale. In base al comportamento sopra descritto, è prassi comune indicare i due approcci rispettivamente come:

- Switched Beam (SA-SB);
- Adaptive Array (SA-AA).

In entrambi i casi, il fascio da impiegare per la trasmissione in downlink è selezionato o guidato in base alle informazioni pervenute dall'uplink, note con l'acronimo di DOA (Direction Of Arrival). La DOA può essere considerata come una stima della direzione di arrivo del segnale, o come l'identificazione del fascio "migliore" proveniente dall'uplink. Così facendo, è possibile incrementare la capacità e l'efficienza spettrale del collegamento, estendendo l'area di copertura del territorio e contemporaneamente riducendo il ritardo di propagazione, il fading provocato da canale multipath, l'interferenza co-canale, la complessità del sistema, la BER (Bit Error Rate) e conseguentemente la probabilità di fuori servizio (*outage*) del sistema. Il ritardo e il fading possono essere ridotti se l'antenna è in grado di disporre il fascio in alcune direzioni desiderate e di cancellare alcune delle repliche del segnale che arrivano ritardate nel tempo. La complessità del sistema e i costi diminuiscono con questo tipo di antenne perché occorrono meno BTS per garantire la prefissata QoS. L'incremento dell'efficienza spettrale inoltre è il risultato della capacità dell'antenna di provvedere alcuni canali virtuali in un dominio angolare. Questa caratteristica è nota come SDMA (Spatial Division Multiple Access), tecnica che consente di moltiplicare i canali nello spa-

zio, così come accade nel tempo o in frequenza, e di servire contemporaneamente più utenti allocandoli nello stesso canale e nella stessa cella con una semplice separazione angolare. Infine la riduzione della probabilità di outage è possibile proprio grazie all'aumento dei canali disponibili.

Il diverso comportamento delle antenne SA-SB e SA-AA nei confronti del segnale utile o degli interferenti eventualmente presenti è visibile nella fig. 15. Entrambi i sistemi ricevono il segnale desiderato all'interno del lobo principale del diagramma di irradiazione dell'antenna, ma nel caso di SA-AA l'utente si trova esattamente nella direzione di massima irradiazione. Allo stesso modo entrambi trattano il segnale interferente in una zona a basso guadagno fuori dal lobo principale ma in SA-AA questo viene soppresso quasi del tutto.

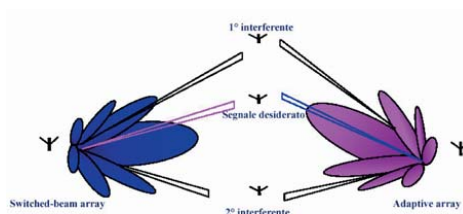


Fig. 15 - Confronto tra SA-SB e SA-AA.

Tecniche Ibride (H)

Un'altra categoria di possibili contromisure, ottenuta dalla combinazione di schemi in diversità da un lato e smart antennas dall'altro è indicata con il nome di *tecniche ibride*. Esistono in letteratura diversi lavori in cui è stato mostrato che le prestazioni di una rete GSM possono essere ulteriormente migliorate, in termini di capacità o di robustezza agli interferenti, utilizzando congiuntamente alcune delle tecniche sin qui trattate, come gli SA-AA e la trasmissione/ricezione in diversità. A tal proposito un esempio interessante, riferito con il nome di STBC-AA, è mostrato in [24].

Contromisure individuate per la rete GSM-R

La tabella 2 riporta la selezione delle tecniche MIMO tra quelle su indicate per la protezione specifica del segnale radio GSM-R principalmente da indisponibilità causate da handover e fading da multipath. Tale scelta è presentata sulla base di esperienza specifica e di risultati presenti nella letteratura tecnica specialistica. Sebbene queste soluzioni siano state individuate specificatamente per la tratta AV/AC TO-NO, la loro validità è del tutto generale in quanto dipendente esclusivamente dalla tipologia

della rete e dalle caratteristiche del segnale sotto esame (GSM-R), e ben si adatta quindi anche alle altre tratte ferroviarie ad alta velocità presenti sul territorio italiano.

TABELLA 2

CONTROMISURE POSSIBILI DA ADOTTARE SULLA SOTTOTRATTA AV/AC TO-NO

Fattore di degrado / Sorgente d'interferenza	Contromisure proposte
<b>GSM-R Handover</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tecniche di ricezione in diversità (RD)</li> <li>2. Smart Antennas con Adaptive Array (SA-AA)</li> </ol>
<b>Doppler shift e Doppler spread</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tecniche di ricezione in diversità (RD)</li> <li>2. Smart Antennas con Adaptive Array (SA-AA)</li> </ol>
<b>Interferenze da E-GSM</b>	<p>Non è necessaria alcuna contromisura specifica. L'adozione di contromisure quali:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tecniche di ricezione in diversità (RD)</li> <li>2. Smart Antennas con Adaptive Array (SA-AA)</li> </ol> <p>consigliate per handover e fading da multipath permette comunque di innalzare il valore del rapporto (C/I) lungo la tratta.</p>
<b>Interferenze da canali TV</b>	<p>Non è necessaria alcuna contromisura specifica. L'adozione di contromisure quali:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tecniche di ricezione in diversità (RD)</li> <li>2. Smart Antennas con Adaptive Array (SA-AA)</li> </ol> <p>consigliate per handover e fading da multipath permette comunque di innalzare il valore del rapporto (C/I) lungo la tratta.</p>
<b>Fading da multipath</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tecniche di trasmissione in diversità (TD)</li> <li>2. Tecniche di ricezione in diversità (RD)</li> <li>3. Smart Antennas con Adaptive Array (SA-AA)</li> <li>4. Tecniche Ibride (H)</li> </ol>

5. Conclusioni

In questo lavoro è stata presentata una procedura da seguire per la valutazione dei fattori di rischio indisponibilità nell'uso della rete wireless GSM-R per applicazioni ferroviarie italiane di tipo AV/AC. Sebbene sia stata applicata in dettaglio al caso di studio particolare della tratta TO-NO, la procedura suddetta presenta validità del tutto generale, tale da poter essere riutilizzata nel caso di qualsiasi tratta ferroviaria ad alta velocità impiegante il sistema GSM-R per trasmissioni dati/voce ed operazioni di segnalamento.

I principali risultati derivanti dall'applicazione di questa procedura al caso di studio della tratta AV/AC sin qui

preso in considerazione (quello relativo alla RO-NA, non è stato riportato per questioni di limitazioni di spazio) e dai diversi SW di simulazione specificatamente realizzati in linguaggio C dagli autori per la valutazione delle eventuali indisponibilità, sono essenzialmente i seguenti:

- alcune sorgenti d'interferenza / fonti di indisponibilità extra-sistema considerate, come i dispositivi RADAR di ausilio al traffico aereo, le radio FM, il fenomeno di attenuazione del segnale per propagazione in galleria e per fenomeni meteorologici, possono essere considerati in prima approssimazione ininfluenti ai fini del verificarsi di situazioni di fuori servizio (outage) del sistema GSM-R lungo la tratta ferroviaria;
- le emissioni dei trasmettitori E-GSM e TV rappresentano potenziali interferenze radio nei confronti del segnale GSM-R; tuttavia, lungo le tratte considerate non sono stati individuati punti particolarmente critici dal punto di vista radio-propagativo, in quanto sia il livello di rapporto segnale/interferenza dovuto ai trasmettitori E-GSM che ai trasmettitori TV, si è dimostrato sufficientemente alto da garantire comunque una buona rivelazione del segnale GSM-R;
- l'uso congiunto di tecniche di ricezione in diversità spaziale (RD) e antenne adaptive array (SA-AA) appare un fattore fondamentale nell'incremento delle prestazioni in termini di affidabilità e QoS del sistema GSM-R, in particolare per la riduzione delle indisponibilità da handover e fading da multipath;
- il piano di test suggerito e le modalità con cui viene attuato sono atti alla validazione del modello di propagazione adottato e delle contromisure suggerite per la riduzione dei fattori di rischio indisponibilità, ove presenti.

BIBLIOGRAFIA

[1] S. M. ALAMOUTI, "A Simple Transmit Diversity technique for Wireless Communications", IEEE JSAC, vol. 16, no. 8, pp. 1451-58, Oct. 1998.

[2] S. BELLOFIORE, C.A. BALANIS, J. FOUTZ, A.S. SPANIAS, "Smart antenna systems for mobile communications networks, part I: Overview and antenna design", IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol 44, No. 3, June 2002.

[3] S. BELLOFIORE, C.A. BALANIS, J. FOUTZ, A.S. SPANIAS, "Smart antenna systems for mobile communications networks, part II: Beamforming and network throughput" IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol 44, No.4, August 2002.

[4] E. BIGLIERI, R. CALDERBANK, A. CONSTANTINIDES, A. GOLDSMITH, A. PAULRAY, H. V. POOR, "MIMO wire-less communications", Cambridge University Press 2007.

[5] EIRENE Web Site, <http://gsm-r.uic.asso.fr/eirene.html>

[6] ERTMS Web Site, <http://www.ertms.com>

- [7] ETCS Web Site, <http://etcs.uic.asso.fr>
- [8] G. J. FOSCHINI, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas", Bell Labs Tech. J., Vol. 1, No. 2, pp. 41-59, Autumn 1996.
- [9] P. W. WOLNIANSKY, G. J. FOSCHINI, G. D. GOLDEN, R. A. VALENZUELA, "V-BLAST: An Architecture for Realizing Very High Data Rates Over the Rich-Scattering Wireless Channel", Proc. ISSSE-98, Pisa, Italy, September 1998.
- [10] "UIC Project EIRENE: Functional Requirements Specification", v. 7.0, 17 Maggio 2006.
- [11] GRASS (GSM-R Risk Assessment), "Descrizione dettagliata del piano di lavoro", Tratta AV/AC Roma-Napoli, RFI S.p.A., Intecs S.p.A, Università di Pisa, Maggio 2004.
- [12] GRASS-II (GSM-R Risk Assessment-II), "Analisi dei documenti tecnici e definizione dettagliata del piano di lavoro", Tratta AV/AC Torino-Novara, RFI S.p.A., Intecs S.p.A, Università di Pisa, Agosto 2006.
- [13] GRASS-II (GSM-R Risk Assessment-II), "Calcolo del rapporto segnale/interferenza lungo la tratta AV TORINO", RFI S.p.A., Intecs S.p.A, Università di Pisa, Dicembre 2006.
- [14] ETSI I-ETS 300 033, European digital cellular telecommunications system (Phase 1); Radio Transmission and Reception (GSM 05.05), 2001.
- [15] GSM-R Web Site, <http://gsm-r.uic.asso.fr>
- [16] ITU-R P.837-4 - Characteristics of precipitation for propagation modelling.
- [17] J. G. PROAKIS, "Digital Communications", McGraw-Hill, New York, 1989.
- [18] Consorzio Saturno, "Sistema TLC Terra-Treno - Schema d'Impianto - Distribuzione lungo linea Apparatati Sottosistema Terra-Treno - Subtratta Torino-Novara". Rev. C, 28/07/05.
- [19] Sirti S.p.A, "Risultati misure livello di campo lungo la sottotratta Torino-Novara".
- [20] "UIC Project EIRENE: System Requirements Specification", v. 15.0, 17 Maggio 2006.
- [21] C. STAMM, "Algorithms and Software for Radio Signal Coverage Prediction in Terrains", nr. 14283, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zürich, 2001.
- [22] V. TAROKH, N. SESHADRI, AND A. R. CALDERBANK, "Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance criterion and code construction", IEEE Trans. on Inform. Theory Vol. 44, No. 2, pp. 744 - 765, March 1998.
- [23] V. TAROKH, H. JAFARKHANI, AND A. R. CALDERBANK, "Space-Time Block Codes from Orthogonal De-signs", IEEE Trans. Info. Theory, vol. 45, no. 5, pp. 1456-67, Jul 1999.
- [24] L. WEI, T.A. GULLIVER, "Smart antennas and transmit diversity for GSM systems", IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and signal Processing PACRIM 2003, Vol. 1, pp. 119-122, 28-30 Aug. 2003.
- [25] J. H. WINTERS, "Smart antennas for wireless systems", AT&T Labs-research, IEEE Personal Communications, Febbraio 1998, pp. 23-27.
- [26] ETCS BOOK, <http://www.etcsbook.com>.

### LIBRI RICEVUTI

Atti del Convegno "GENOVA ROTTERDAM - Opportunità e minacce per il Verbano Cusio Ossola" - BAVENO (VB) 4 marzo 2005 - Camera di Commercio del VCO, 2006 - Relatori: Guido LUCARNO - Roberto FERRAVANTE.

RIZZI Paolo, MOLÈ Mario (a cura di) "SVILUPPO LOCALE E VALORIZZAZIONE TURISTICA: il sistema Ragusa" - Regione Siciliana, Assessorato al Lavoro, Ragusa 2006.

**Sommaire**

EVALUATION DES FACTEURS DE RISQUE PAR INDISPONIBILITÉ DANS L'USAGE DU RÉSEAU RADIO GSM-R POUR LES APPLICATIONS FERROVIAIRES ITALIENNES À HAUTE VITESSE / HAUTE CAPACITÉ (AV/AC).

Le but principal de cet article est celui d'établir la succession des activités d'analyse et simulation à exécuter au fin d'effectuer un'évaluation préliminaire des facteurs de risque par indisponibilité dans l'emploi du réseau radio GSM-R pour applications ferroviaires italiennes à haute vitesse / haute capacité (AV/AC). Plus en détail, le réseau sans fils GSM-R est typiquement employé pour les communications terre/bord que pour les opérations de signalisation dans le réseau ferroviaire AV/AC de RFI S.p.A, en accord aux normes techniques européens ERTMS/ETCS de niveau 2.

Au cours du travail on décrit dans l'ordre les activités de base nécessaire à l'évaluation des facteurs de risque par indisponibilité, avec particulière attention à ceux qui sont dus à l'effet des interférences radio externes au système dans la bande de fréquence employé par le système GSM-R.

Ce document rend compte de façon explicite des principaux résultats des activités d'analyse du risque réalisées sur deux cas d'étude, représentés par les lignes ferroviaires AV/AC Rome-Naples et Turin-Novara, de récente activation de la part de RFI. Ce-là dit, la méthodologie montrée ici a validité tout à fait générale et peut être répliquée à n'importe quelle ligne ferroviaire AV/AC de future construction et mise en oeuvre, comme par exemple la ligne Milan-Bologne. Comme confirmation de la validité de l'approche présenté ici, on documente enfin, à titre d'exemple, les résultats des campagnes d'essai effectuées par des tiers dans les cas de la ligne Turin-Novara, lesquels montrent un bon degré de correspondance avec ceux obtenus dans les même scénario au cours de l'étude présentée ici.

**Summary**

EVALUATION OF THE UNAVAILABILITY RISK FACTORS IN THE USE OF GSM-R RADIO NETWORK FOR ITALIAN HIGH SPEED/HIGH CAPACITY RAILWAY APPLICATIONS

The main aim of this paper is to define the sequence of the analysis and simulation activities to be carried out in order to achieve a preliminary estimation of the unavailability risk factors in the use of GSM-R radio network for Italian high speed/high capacity railway applications.

Specifically, GSM-R wireless network is used both for ground-train communications and as a support for signalling data transmission in the RFI S.p.A. HS/HC railway network, according to Level 2 ERTMS/ETCS European Specifications.

Moreover this paper describes the basic activities that are necessary to the evaluation of the above-mentioned unavailability risk factors, with a special regard to radio interference risks from other systems in the GSM-R frequency band. This work shows clearly the main results of the risk analysis activity carried out on two case-studies, the Rome-Naples and Turin-Novara HS-HC line sections, recently activated by RFI. Anyway, the illustrated methodology has a general validity and can be applied to any HS-HC line section under design or construction such as for instance the Milan-Bologna line section. As a confirmation of the validity of the illustrated approach, the results of specific test campaigns carried out by a third part on the Turin-Novara line section are here finally showed as an example. These results show a good level of matching with the results here achieved in the same scenery.

**Zusammenfassung**

BEWERTUNG DER RISIKOFAKTOREN DIE DIE VERFÜGBARKEIT DER GSM-R NETZ DER ITALIENISCHEN NBS NEGATIV BEEINFLUSSEN KÖNNEN

Hauptzweck der Verfassung ist der Folge der Analyse - und Simulation Aktivitäten um eine einleitende Bewertung der Risikofaktoren von nicht Verfügbarkeit die GSM-R Systems der NBS in Italien zu erreichen - In Italien versichert die wireless GSM-R Netz die Funk Verbindung zwischen Zügen und Kontrollstellen und signaltechnischen Funktionen des ERTMS/ETCS Lev. 2 Systems.

Es werden die Grundaktivitäten examiniert, die dazu dienen, mit besonderen Achtung an die Folgerungen der ausseren Interferenzen innerhalb der Frequenzband des GSM-R.

Zwei "case studies", Rom-Neapel und Turin-Novara, werden dargestellt, aber die Methodik und die Resultaten bewahren eine allgemeine Gültigkeit, die sie auch für andere Linien verwendbar macht.

Zur Bestätigung der obenerwähnten Gültigkeit gelten die Resultaten von weiteren Prufkampagnen, die von anderen Unternehmen auf der selben Linie Turin-Novara geführt wurden. Diese Resultaten werden hier vorgestellt.