

## Impianti di radiopropagazione in galleria

*Dott. Ingg. Massimo RUSSO(\*), Girolamo CLEMENZA(\*\*),  
Roberto GRECO(\*\*\*)*

### 1. Introduzione

#### 1.1. Scopo

Il sistema di telefonia mobile GSM ha raggiunto in Italia un livello di copertura quasi totale del territorio e in particolare delle linee ferroviarie. Gli Operatori di telefonia mobile infatti stanno incrementando la realizzazione di siti radio dedicati a migliorare il servizio telefonico dei propri clienti nelle stazioni e lungo le linee principali.

Le criticità di copertura radio si hanno in corrispondenza delle gallerie ferroviarie e per risolvere tali inconvenienti sono stati realizzati negli ultimi anni degli impianti detti di "radiopropagazione" o "radio estensione" in galleria. Tali impianti estendono all'interno dei tunnel la copertura radio presente agli imbocchi GSM - Railway e GSM-Pubblico (nel seguito indicato come GSM-P) in banda 900 MHz degli Operatori di telefonia mobile.

La funzione principale degli impianti di radio estensione consiste nel rendere disponibile il servizio di telefonia mobile GSM-R e/o GSM-P (per le tratte senza copertura GSM-R) al personale di condotta dei treni all'interno delle gallerie così come è presente lungo linea e agli imbocchi dei tunnel.

La copertura radio delle gallerie con segnale GSM-P ripetuto permette naturalmente anche ai viaggiatori di usufruire del servizio di telefonia mobile all'interno dei tunnel.

Nelle gallerie delle tratte AC/AV, inoltre, nelle quali il traffico ferroviario è gestito tramite il sistema ERTMS che utilizza come supporto trasmissivo il sistema radio GSM-R, l'esigenza di garantire un'adeguata copertura radio GSM-R per la sicurezza della marcia treno è più evidente e rigorosa. Nelle gallerie delle tratte AC/AV, pertanto, la copertura radio GSM-R viene realizzata con siti radio dedicati (BTS: Base Transceiver Station) e sistemi di antenne installate agli imbocchi e, dove necessario, all'interno delle gallerie per avere la massima sicurezza della garanzia e ridondanza delle comunicazioni mobili. La trattazione di tali impianti non è oggetto di questo articolo.

Infine, si evidenzia che anche la Specifica Tecnica TT587 rev. B "Impianti di telecomunicazioni per la sicurezza nelle gallerie ferroviarie", di recente emessa da RFI per recepire nel settore telecomunicazioni i criteri di messa in sicurezza delle gallerie ferroviarie dettati dal DM 28/10/2005, richiede che la copertura radio GSM-R delle gallerie ferroviarie sia realizzata utilizzando criteri e impianti (siti radio GSM-R dedicati) come in ambito AC/AV.

Anche in tali contesti (AC/AV e messa in sicurezza delle gallerie secondo DM 28/10/2005) gli impianti di radiopropagazione, trattati nel presente articolo, vengono realizzati per garantire il servizio di telefonia mobile ai viaggiatori e per assicura-

re una ulteriore ridondanza al sistema GSM - R.

#### 1.2. Contenuti

Verranno illustrati gli impianti di radiopropagazione in galleria, intendendo con ciò i sistemi per l'estensione all'interno delle gallerie di segnali radio, in particolare nella banda GSM Pubblico e "Railway", già esistenti agli imbocchi delle stesse gallerie. Nella presente trattazione si considera, pertanto, pre-esistente un adeguato segnale radio GSM agli imbocchi delle gallerie: tale premessa rappresenta il dato di base fondamentale per garantire una adeguata copertura radio e un conseguente idoneo livello qualitativo di segnale reale e percepito da parte dell'utente (pubblico e/o ferroviario) all'interno della galleria.

In particolare dopo aver illustrato le diverse tipologie di impianto previste per le varie tipologie di situazioni, verranno altresì dettagliati i singoli casi reali di applicazioni e realizzazioni delle suddette tipologie/architetture impiantistiche in alcune gallerie della rete ferroviaria italiana.

#### 1.3. Informazioni di base

Lo schema di un impianto qualsiasi di estensione del segnale radio prevede sempre un sito esterno GSM-P e/o "Railway" (distante anche alcuni chilometri) dal quale, tramite antenne installate agli imbocchi della galleria ed opportunamente "puntate", prelevare il segnale da ripetere nel tunnel.

Da tali antenne, attraverso opportuni apparati (filtri, amplificatori, cavi, ecc.) posti nella stazione di testa (ST) situata all'imbocco della galleria, il segnale viene portato ai sistemi radianti installati all'interno del tunnel per renderlo disponibile all'utenza (fig. 1).

Le tipologie di sistemi radianti, nonché dei sistemi di trasporto, rigenerazione e amplificazione del segnale all'interno della galleria sono molteplici, variando in base al tipo di galleria, come verrà di seguito illustrato.

(\*) Italferr - Direzione Tecnica, Responsabile U.O. Telecomunicazioni.

(\*\*) Italferr - Direzione Tecnica, U.O. Telecomunicazioni.

(\*\*\*) RFI - Direzione Tecnica, Dir. Norme e Standard - Telecomunicazioni e Supervisione.

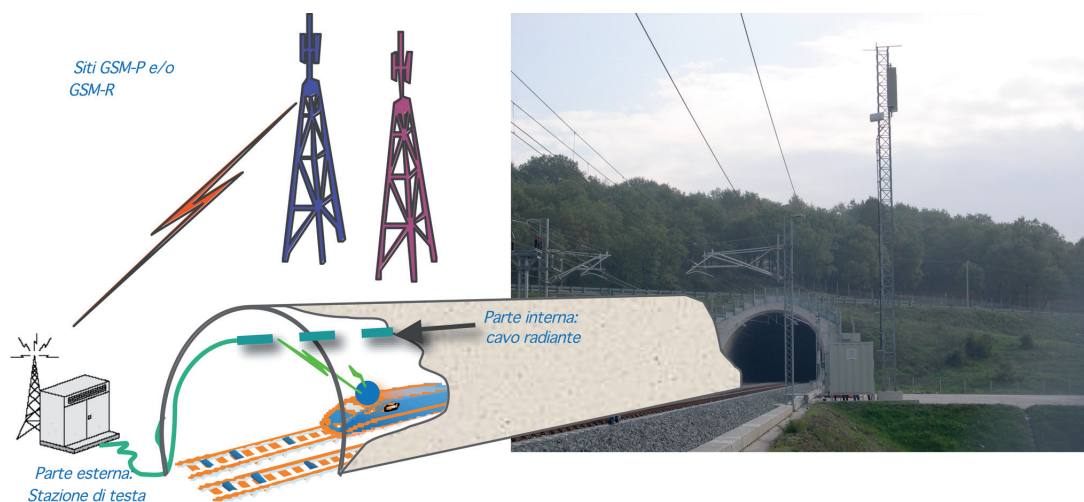


Fig. 1 – Schema di insieme di un impianto di radiopropagazione.

In tale ambito gli impianti di radiopropagazione vengono realizzati per garantire il servizio di telefonia mobile ai viaggiatori e per assicurare una ulteriore ridondanza al sistema GSM - R.

## 2. Riferimenti normativi

I riferimenti normativi per gli impianti di radiopropagazione in galleria sono:

1. Specifica Tecnica RFI DITCTSSR-TL08001 rev. D "Impianti di Radiopropagazione per gallerie ferroviarie" che indica le direttive da seguire per quanto riguarda gli aspetti radioelettrici (coerentemente agli standard fissati in ambito ETSI);
2. Specifica Tecnica RFI RFI TC ST IS-TLC 00 017 rev. A "Modalità di realizzazione dei collegamenti tra i vari componenti degli impianti di copertura radio delle gallerie ferroviarie. Appendice n. 1 alla Specifica Tecnica IS728" per quanto riguarda i sistemi di alimentazione, messa a terra e protezione dalle sovratensioni;
3. DM 381/98, legge quadro 36/2001, DL 1/08/2003 n. 259, DL 19/11/2007 n. 257 e successive integrazioni

per quanto concerne i limiti di emissione elettromagnetica.

## 3. Glossario

BTS: Base Transceiver Station

DCN-IP: Digital Communication Network – Internet Protocol

GSM: Global System Mobile

NOC: Nucleo Operativo Centrale

SACCH: Slow Associated Control Channel

SDH: Synchronous Digital Hierarchy



Fig. 2 – Shelter e traliccio.

## 4. Tipologie di impianto

Gli impianti di radiopropagazione sono costituiti da una parte esterna alla galleria e da una interna (figg. 2, 3, 4 e 5).



Fig. 3 – Particolare stazione di testa.

La parte esterna è costituita da:

- sistema di antenne e relativi supporti (palo o traliccio);
- apparato ripetitore (nel seguito indicato come stazione di testa) dotato di opportuno sistema di alimentazione (stazione di energia), installato in "shelter" (strut-

tura metallica prefabbricata atta a contenere gli apparati) o in fabbricati tecnologici presenti all'imbocco.

La parte interna è costituita da:

- sistemi radianti: antenna o cavo radiante (detto anche cavo fessurato);
- sistemi di amplificazione del segnale radio.



Fig. 4 – Cavo radiante installato sulla volta della galleria.



Fig. 5 – Antenna installata sulla volta della galleria.

La parte esterna riceve il segnale radio dai siti GSM-R e GSM-P che realizzano la copertura della linea ferroviaria nell'area dell'imbocco della galleria, chiamati "celle donatrici" (riferimenti bibliografici: specifiche tecniche European Telecommunications Standards Institute ETSI GSM 05.05 e GSM 03.30).

Il segnale radio all'interno della stazione di testa viene filtrato (vengono selezionate le frequenze del segnale radio degli Operatori di telefonia mobile che si intende ripetere in galleria), amplificato e trasmesso, tramite un cavo coassiale, opportunamente dimensionato, ai sistemi radianti installati in galleria.

A seconda della tipologia e della lunghezza della galleria il sistema radiante può essere costituito da antenne o cavo radiante (un cavo che presenta delle fessure ed opera come un'antenna distribuita).

Sempre in base alle caratteristiche della galleria, il segnale può essere amplificato all'interno del tunnel con amplificatori bidirezionali in cascata oppure con amplificatori in derivazione ottica (remotizzatori), affinché venga ricevuto dai telefoni mobili con un livello di segnale adeguato.

Questa catena di propagazione viene chiamata Percorso di "Down-Link".

Analogamente il segnale trasmesso dai telefoni mobili in galleria fa il percorso inverso, essendo prima ricevuto dai sistemi radianti, poi eventualmente amplificato e infine processato dalla stazione di testa all'esterno della galleria. Qui il segnale viene rigenerato e trasmesso alle BTS dei siti GSM-R e GSM-P.

Questa catena di propagazione viene chiamata Percorso di "Up-Link".

I criteri per dimensionare un impianto di radiopropagazione in galleria che svolga efficientemente quanto sopra descritto sono dettati dalla specifica tecnica Rif.1.

In funzione della lunghezza della galleria e del livello di campo elettro-

magnetico minimo richiesto ( $-78$  dBm – Rif.1) per la copertura del tunnel, si determina di volta in volta una delle seguenti architetture:

- 1) impianto "stand-alone" con antenna di copertura installata all'imbocco della galleria e collegata alla stazione di testa: utilizzato su gallerie lunghe dai 300 ai 400 metri;
- 2) impianto "stand-alone" con singolo spezzone di cavo radiante collegato alla stazione di testa: utilizzato su gallerie lunghe fino a circa 900 metri;
- 3) impianto "in cascata" con cavo radiante e amplificatori di linea collegati alla stazione di testa; gli amplificatori ricevono l'alimentazione tramite il cavo radiante e sono supervisionati dalla stazione di testa: utilizzato su gallerie lunghe fino a 5000 metri;
- 4) impianto "in derivazione ottica" con cavo radiante e amplificatori (remotizzatori) in derivazione ottica, collegati alla stazione di testa tramite fibra ottica ed alimentati con linea dedicata: utilizzato su gallerie lunghe oltre 5000 metri.

La specifica al Rif. 1 non dà indicazioni sulle lunghezze delle gallerie e le relative architetture da impiegare; i criteri per le scelte progettuali su elencate sono frutto dell'esperienza maturata nella realizzazione dei vari impianti. Ovviamente possono presentarsi casi particolari per i quali può non essere opportuna una delle architetture precedentemente indicate, ma va trovata una soluzione adeguata.

Per le gallerie lunghe più di 2000 metri, la specifica tecnica sopra menzionata prescrive l'utilizzo di due stazioni di testa, una per ciascun imbocco. In tal caso, all'interno della galleria è realizzata una apposita sezione dove i segnali provenienti dai due imbocchi si devono opportunamente sovrapporre per permettere ai terminali mobili di effettuare la procedura di "handover" (cambio di cella servente).

L'architettura 1), ossia "stand-alone" con antenna (fig. 6) è la più sem-

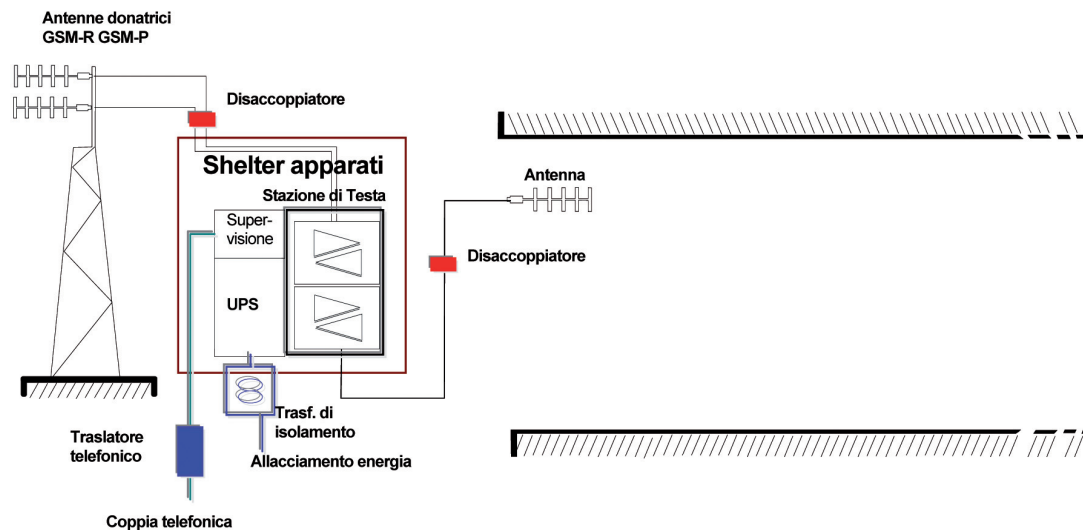


Fig. 6 – Impianto “stand-alone” con antenna.

plice da realizzare in quanto all'interno della galleria richiede la sola installazione dell'antenna.

L'architettura 2), ossia “stand-alone” con cavo radiante (fig. 7) richiede dal punto di vista realizzativo la posa

in galleria del cavo radiante. Generalmente a fine cavo radiante si installa un'antenna per estendere la cella

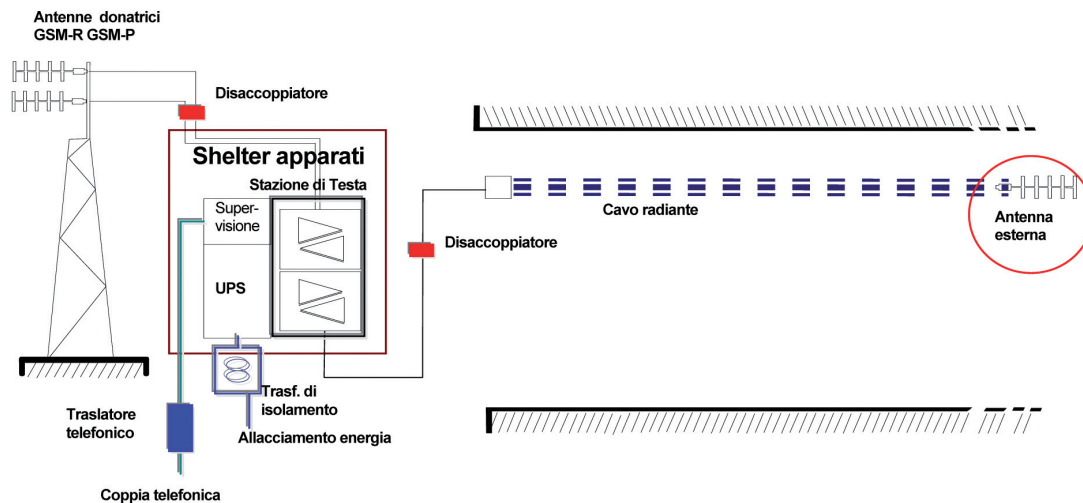


Fig. 7 – Impianto “stand-alone” con cavo radiante.





Fig. 8 - Antenna esterna.

presente in galleria anche in esterno (fig. 8).

L'architettura 3), ossia in cascata (fig. 9) prevede all'interno della galleria degli spezzoni di cavo radiante intervallati da amplificatori bidirezionali (al massimo sette). Gli amplificatori ricevono l'alimentazione tramite il cavo radiante e sono supervisionati dalla stazione di testa. Nel caso di uti-

lizzo di un'unica stazione di testa, a fine cavo si installa un'antenna per estendere la cella presente in galleria anche in esterno.

Nel caso di presenza di due stazioni di testa, per realizzare la procedura di "handover" sarà presente un'area (utilizzando un unico spezzone di cavo radiante o due cavi radianti separati) dove sono estesi i segnali di entrambi gli imbocchi.

La lunghezza della tratta di "handover" va dimensionata in funzione della velocità del treno, del tempo medio per effettuare la procedura di cambio cella (5-6 secondi) e dei margini di sistema.

Mediamente la lunghezza della tratta di "handover" è compresa tra 500 e 800 metri circa mentre in ambito AV, dove il treno può raggiungere i 300 km/h, è lunga circa 1.000 metri.

L'architettura 4), ossia in derivazione ottica (fig. 10) prevede l'utilizzo di una stazione di testa connessa in fibra ottica agli amplificatori, detti remotizzatori, che rigenerano il segnale radioelettrico e lo irradiano in galleria tramite due spezzoni di cavo radiante.

Come nel caso precedente, quan-

do sono previste due stazioni di testa si prevede un'area di sovrapposizione dei segnali estesi dai due imbocchi per realizzare la procedura di "handover".

La tratta di "handover" viene realizzata collegando con un unico cavo radiante gli ultimi amplificatori pilotati da ciascuna stazione di testa e posti a circa 800-1000 metri di distanza.

## 5. Sistema di supervisione

Ciascun impianto di radiopropagazione è dotato di un sistema di supervisione locale, accessibile all'utente collegando un PC portatile direttamente alla stazione di testa.

È previsto un sistema di supervisione centrale presso il centro compartimentale, collegato a tutti gli impianti realizzati nell'area di competenza per la gestione degli stessi da remoto.

A loro volta i sistemi di supervisione compartimentali (fig. 12) sono raggiungibili, tramite i sistemi di telecomunicazioni ferroviari, dal centro di supervisione nazionale del NOC (Nucleo Operativo Centrale) di Ro-

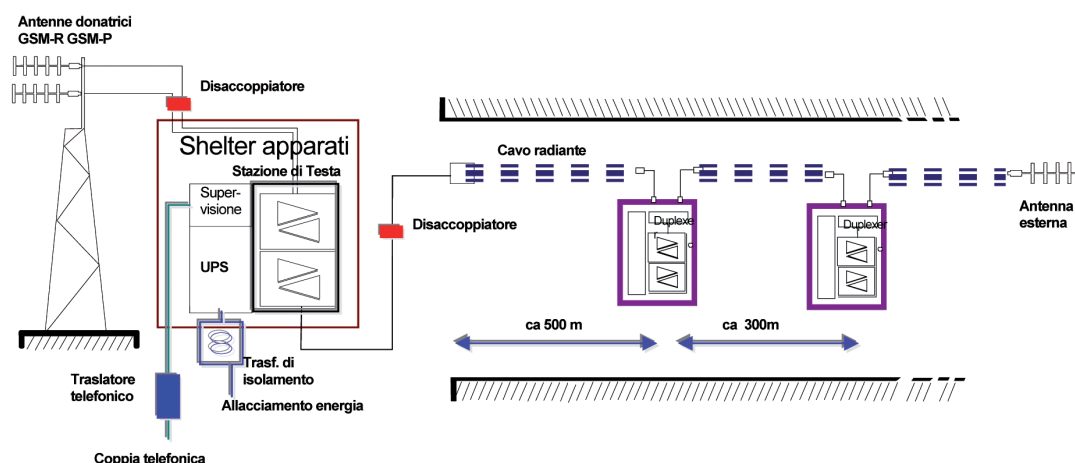


Fig. 9 - Impianto con amplificatori in cascata.

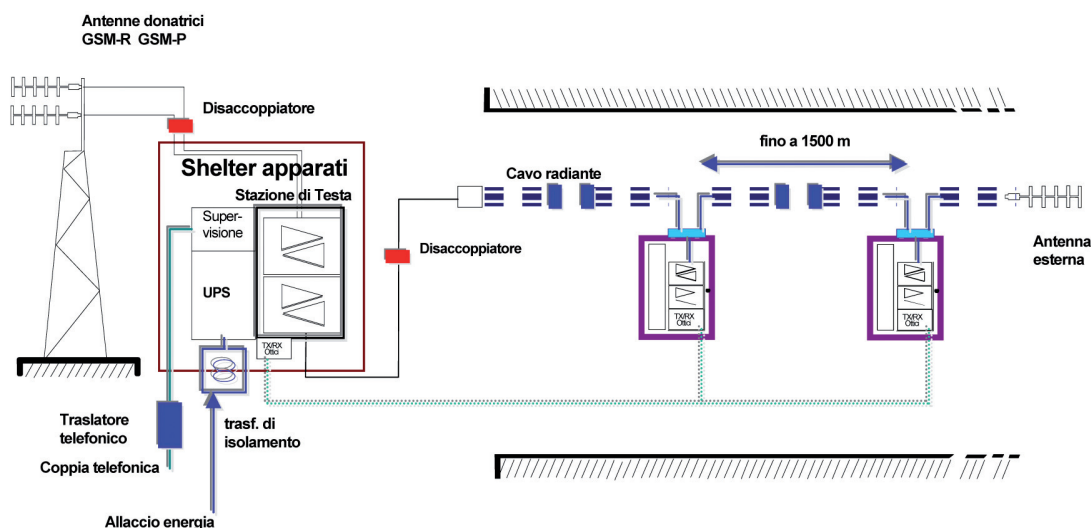


Fig. 10 – Impianto con amplificatori in derivazione ottica.

ma, in modo da avere costantemente lo stato degli impianti sotto controllo.

I sistemi di telecomunicazioni impiegati in questi impianti, per il controllo a distanza, sono modem che utilizzano coppie telefoniche e/o sistemi trasmissivi. Recentemente per ovviare ai problemi di indisponibilità di coppie telefoniche sono stati impiegati con successo collegamenti via radio con appositi modem dotati di interfaccia radio GSM GPRS.

Il collegamento tra i centri compartimentali ed il centro nazionale avviene tramite la rete "DCN-IP" (Di-

gital Communication Network – Internet Protocol) di RFI.

Il sistema di supervisione permettendo di monitorare in tempo reale lo stato di ciascun impianto costituisce un elemento essenziale per garantire la manutenibilità degli impianti stessi.

## 6. Progettazione, realizzazione e messa in servizio degli impianti di radiopropagazione

In fase di progettazione, un impianto viene dimensionato come detto sopra in funzione dei requisiti di

specifici e delle caratteristiche della galleria reale. In questa fase è opportuno fare un sopralluogo per verificare la copertura radio agli imbocchi della galleria, gli spazi necessari per installare gli apparati, eventuali connessioni con sistemi trasmissivi "SDH" (Synchronous Digital

Hierarchy) o coppie telefoniche disponibili e la disponibilità di alimentazione.

Nel caso di gallerie contigue si valuta di volta in volta l'opportunità di realizzare un unico impianto oppure due impianti distinti.

Note quindi le caratteristiche del tunnel si effettua un dimensionamento radioelettrico per definire gli apparati idonei da installare nella galleria presa in esame.

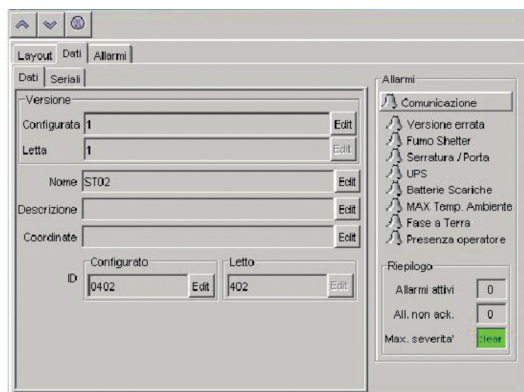
Nella successiva fase realizzativa occorre installare i vari apparati che compongono l'impianto di radiopropagazione (shelter, palo/traliccio, antenne, cavi radianti, ecc.) con non poche difficoltà, tenendo conto anche dei vincoli di esercizio ferroviario, dei permessi e autorizzazioni concessi dagli enti preposti.

Per realizzare le opere civili dell'impianto occorre, infatti, comunicare apposita DIA (Dichiarazione Inizio Attività) all'ufficio tecnico del comune di riferimento dopo aver chiesto il permesso all'ente preposto, nel caso l'area dove si va a realizzare il sito abbia vincoli urbanistici, paesaggistici, archeologici ecc.

Per le leggi vigenti sull'emissione



Fig. 11 – Shelter imbocco galleria.



elettromagnetica (DM381/98, legge quadro 36/2001, DM 08/07/2003 e successive integrazioni), occorre preventivamente inviare alla "ARPA" (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente) di riferimento una documentazione tecnica con le caratteristiche di im-

pianto e misure radioelettriche per avere l'approvazione all'accensione del nuovo sistema di radio "estensione".

Per realizzare l'impianto in ambito ferroviario, se la linea è in esercizio come spesso accade, occorre lavorare durante le interruzioni programmate della linea stessa.

## 7. Copertura radio delle gallerie e gestione impianti

Recentemente (fine 2008) si è concluso il progetto di radio copertura

Tekno Ferrovic - Browser Allarmi

ID	Dispositivo	Descrizione	Categoria	Severità	Stato	Verificato	Censurato	Ack	AckTime
23	Server Adine/ST02	UPS		Minor	Attivo	11/11/2003 10.56.16			
24	Server Adine/ST01	Comunicazione		Critical	Attivo	11/11/2003 10.56.33			
25	Server Adine/ST05/061.00	Comunicazione		Critical	Attivo	11/11/2003 10.56.44			
26	Server Adine/ST05/Rack Banda GSM...	Sovraccarico		Minor	Attivo	11/11/2003 10.57.37			
20	Server Adine/ST05/Rack Banda GSM 01...	Temperatura		Minor	Attivo	11/11/2003 10.57.40			
27	Server Adine/ST05/Rack Banda GSM 01...	Sovraccarico		Minor	Attivo	11/11/2003 10.57.37			
29	Server Adine/ST05/Rack Banda GSM 01...	Temperatura		Minor	Attivo	11/11/2003 10.57.40			

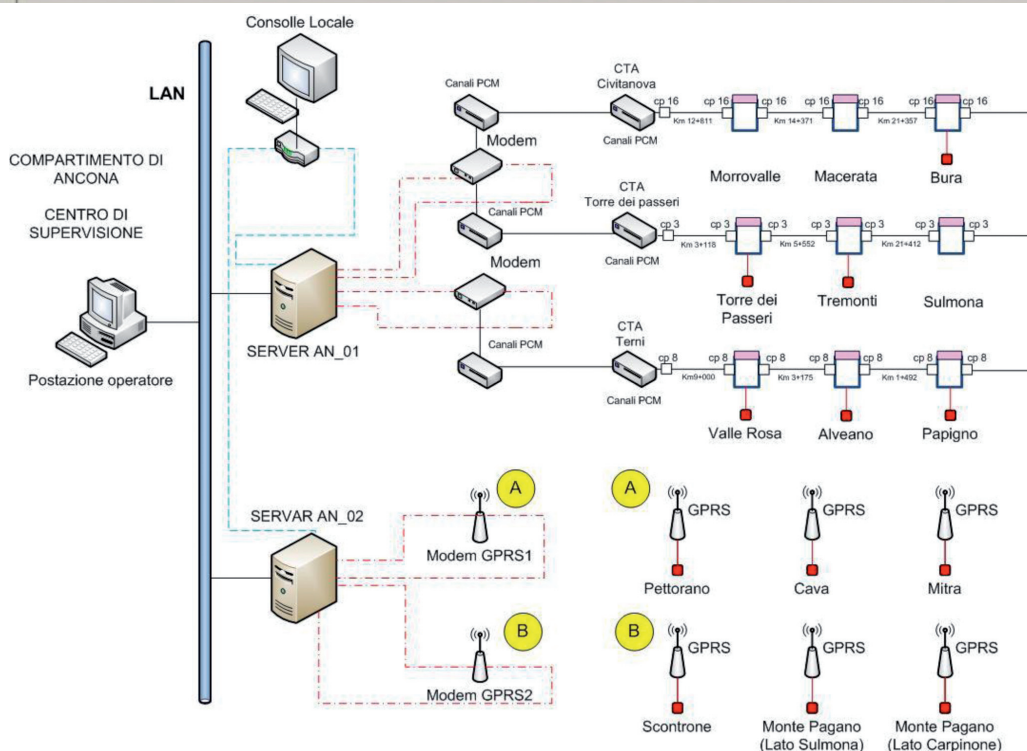


Fig. 12 - Esempi di interfaccia grafica e a finestra del sistema di supervisione.

delle gallerie delle tratte di Linea Storica superando la soglia di 1300km di gallerie con copertura radio.

Sono state attrezzate con impianti di estensione GSM-P anche tutte le gallerie delle Tratte ad Alta Velocità ed in particolare la tratta AC/AV Bologna-Firenze che è caratterizzata da una successione di gallerie (in totale 73 km su 78 km di tratta) e per le quali sono ancora in corso le ultime fasi di messa a punto degli impianti.

Poiché gli impianti di radiopropagazione in galleria estendono il segnale GSM-R (solo in ambito Linea Storica) e GSM-Pubblico, essi devono essere continuamente mantenuti in efficienza e allineati con le reti degli Operatori Telefonici.

Per quanto riguarda il GSM-R, essendo una rete direttamente gestita da RFI, è possibile tenere perfettamente aggiornati e allineati gli impianti di estensione con la rete GSM-R.

Per il GSM-P occorre eventualmente adeguare gli impianti in funzione delle variazioni della rete GSM degli Operatori di Telefonia mobile.

Le reti di telefonia mobile GSM sono infatti in continua evoluzione perché ciascun Operatore Telefonico adegua o incrementa il numero di siti

radio al fine di garantire un migliore servizio alla propria clientela. Inoltre il recente sviluppo e diffusione dei sistemi radiomobili GSM1800MHz e di terza generazione UMTS, in particolare lungo le linee ferroviarie, pur garantendo ai viaggiatori maggiore disponibilità del servizio di telefonia mobile, si rivela una criticità quando il treno entra in galleria. Infatti gli operatori di telefonia mobile fanno in modo che le comunicazioni telefoniche siano preferibilmente allocate sulle frequenze GSM1800MHz o UMTS per ottimizzare la banda disponibile.

Nelle gallerie ferroviarie è esteso però solo il segnale GSM 900MHz. Il terminale mobile in comunicazione sul segnale GSM1800MHz o UMTS non riesce in alcune situazioni ad effettuare il passaggio (handover) alla frequenza GSM900MHz in tempo utile, data la velocità del treno, con conseguente caduta della chiamata.

Per evitare tali inconvenienti sono in corso attività ottimizzazione degli impianti condotte congiuntamente dai tecnici della manutenzione e degli operatori di telefonia mobile al fine di garantire le migliori prestazioni di copertura radio in galleria, che oggi, a volte, non risultano ottimali.

Dopo un iniziale studio teorico della copertura radio della linea ferroviaria e degli imbocchi delle gallerie, gli Operatori di telefonia mobile valutano se modificare i parametri radioelettrici dei propri siti radio GSM o se realizzare dei nuovi siti radio per migliorare la copertura stessa. Di conseguenza le antenne degli impianti di radiopropagazione in galleria che ricevono il segnale dai siti radio GSM-P vengono puntate in modo adeguato per migliorare le prestazioni.

## 8. Esempio di dimensionamento di un impianto di radiopropagazione

Come esempio di impianto è stata scelta la galleria "Annunziata Lunga" (6671m) della linea elettrificata a singolo binario Rocca d'Evandro-Venafro.

L'impianto di tale galleria è costituito da due stazioni di testa agli imbocchi e amplificatori/remotizzatori ottici in galleria con una tratta di "handover" al centro.

La fig. 13 rappresenta l'architettura della galleria Annunziata Lunga.

Il dimensionamento dei parametri radioelettrici dell'impianto va cal-

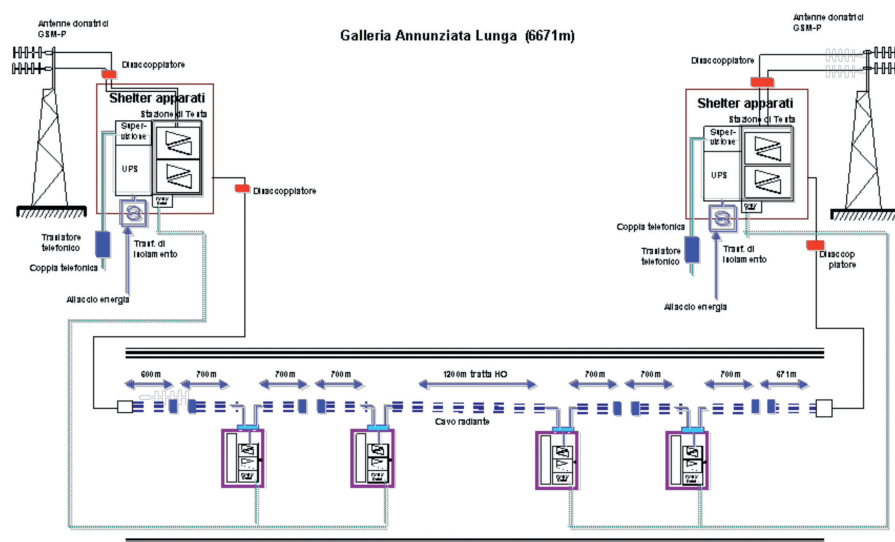


Fig. 13 – Schematico dell'impianto da dimensionare.



## GALLERIE

TABELLA 1

DATI DI SISTEMA

Dati di sistema		
Potenza trasmessa dalla BTS	43	dBm
Sensibilità BST GSM	-104	dBm
Guadagno in diversity	2	dB
Segnale minimo in galleria	-78	dBm
Margine sul segnale in down link	3	dB
Massima potenza di uscita dalla stazione di testa (per portante)	18	dBm
Sensibilità telefono palmare in ricezione	-102	dBm
Potenza TX apparato palmare	33	dBm
C/I minimo	9	dB

TABELLA 2

DATI GENERALI DI IMPIANTO

Dati generali di impianto		
Livello di segnale in aria Operatore 1	-77	dBm
Livello di segnale in aria Operatore 2	-58	dBm
Guadagno antenna verso BTS	16,5	dB
Lunghezza cavo 7/8" tra antenna e stazione di testa	25	m
Lunghezza cavo 7/8" stazione di testa – cavo radiante - codino	70	m
Attenuazione specifica cavo 1/2 "	7,09	dB/100m
Attenuazione specifica cavo 7/8 "	4,01	dB/100m
Attenuazione specifica cavo 1 1/4 "	2,79	dB/100m
Attenuazione specifica cavo 1 5/8 "	2,3	dB/100m
Accoppiamento cavo radiante 95%	64	dB
Lunghezza galleria	6.671	m
Attenuazione disaccoppiatore	1,5	dB
Perdita fibra ottica	0,1	dB/100m
Attenuazione longitudinale cavo radiante	3,3	dB/100m
Perdita splitter	3,5	dB
Attenuazione della carrozza	20	dB

TABELLA 3

DATI DELLA STAZIONE DI TESTA

Dati della stazione di testa	Down-link		Up-link	
Guadagno massimo	80	dB	80	dB
Guadagno minimo	50	dB	50	dB
Figura di rumore NF – Gmax	7	dB	14	dB
Figura di rumore NF – Gmin	16	dB	22	dB
Intercetta 3° ordine IP3 Gmax	60	dBm	60	dBm
Intercetta 3° ordine IP3 Gmin	60	dBm	60	dBm
Potenza massima (2 portanti)	24	dBm	28	dBm
Punto di compressione 1dB IP1	40	dBm	34	dBm
Interfaccia elettro-ottica della stazione di testa: perdita elementi passivi RF	13	dB	29,7	dB

TABELLA 4

DATI DEGLI AMPLIFICATORI/REMOTIZZATORI

Dati remotizzatori ottici	Down-link		Up-link	
Intercetta 3° ordine IP3	60	dBm	40	dBm
Punto di compressione 1dB IP1	40	dBm	40	dBm
Figura di rumore NF – Gmax	7	dB	7	dB
Guadagno massimo	55	dB	40	dB

TABELLA 5

IMPOSTAZIONI DELLA STAZIONE DI TESTA "DOWN-LINK"

Stazione di testa	Operatore 1		Operatore 2	
Potenza trasmessa dalla BTS	43	dBm	43	dBm
Livello del segnale in aria	-77	dBm	-58	dBm
Attenuazione di tratta fino alla BTS (compresa antenna BTS)	120	dB	101	dB
Guadagno antenna ricevente	16,5	dB	16,5	dB
Perdite tra antenna e stazione di testa	2,5	dB	2,5	dB
Livello del segnale in ingresso alla stazione di testa	-63	dBm	-44	dBm
Guadagno del modulo di banda	80	dB	63	dB
Livello effettivo del segnale in uscita dalla stazione di testa	16	dBm	18	dBm
Perdite di connessione tra stazione di testa e cavo radiante	4,3	dB	4,3	dB
System loss cavo radiante connesso alla stazione di testa	83,8	dB	83,8	dB
Livello effettivo del segnale a fondo cavo radiante	-72,1	dBm	-70,1	dBm
Attenuazione carrozza	20	dB	20	dB
Sensibilità telefono palmare in ricezione	-102	dBm	-102	dBm
Margine di sistema	9,9	dB	11,9	dB
Margine di guadagno del modulo di banda	0	dB	17	dB

colato sul percorso "Down-Link" (collegamento dalla cella donatrice al telefono-ricevitore) e su quello Up-Link (collegamento dal telefono-trasmettitore alla cella donatrice).

Nel caso in particolare occorre fare un dimensionamento per ciascuna

stazione di testa e relativi remotizzatori ottici.

Per semplicità, si riporta solo il dimensionamento della stazione di testa OVEST essendo quella EST del tutto analogo.

In prima analisi si procede con un riepilogo dei *dati di sistema* (tabella 1), di impianto e quindi della stazione di testa e dei remotizzatori interni.

La potenza trasmessa dalla BTS del sito radio GSM dell'Operatore di telefonia mobile (cella donatrice) e dai telefoni mobili (palmari) e le relative sensibilità sono dati di riferimento; la potenza trasmessa dalla

TABELLA 6

IMPOSTAZIONI DEL PRIMO REMOTIZZATORE "DOWN-LINK"

Remotizzatori interni Primo remotizzatore	Operatore 1		Operatore 2	
System loss cavo radiante più lungo + codino	87,6	dB	87,6	dB
Segnale effettivo a fine cavo	-75	dBm	-75	dBm
Perdite splitter	3,5	dB	3,5	dB
Segnale necessario in uscita dal remotizzatore	16	dBm	16	dBm
Path ottico				
Perdite per sezione di combinazione	13	dB	13	dB
Perdite dovute al collegamento in fibra ottica	2,8	dB	2,8	dB
Guadagno del remotizzatore	55	dB	55	dB
Livello del segnale nel punto di prelievo	-13	dB	-11	dB
Perdite da impostare nel link ottico per avere il segnale necessario in uscita dal remotizzatore	10	dB	12	dB

TABELLA 7

IMPOSTAZIONI DEL SECONDO REMOTIZZATORE  
"DOWN-LINK"

Remotizzatori interni Secondo remotizzatore	Operatore 1		Operatore 2	
System loss cavo radiante più lungo + codino	87,6	dB	87,6	dB
Segnale effettivo a fine cavo	-75	dBm	-75	dBm
Perdite splitter	3,5	dB	3,5	dB
Segnale necessario in uscita dal remotizzatore	16	dBm	16	dBm
Path ottico				
Perdite per sezione di combinazione	13	dB	13	dB
Perdite dovute al collegamento in fibra ottica	4,2	dB	4,4	dB
Guadagno del remotizzatore	55	dB	55	dB
Livello del segnale nel punto di prelievo	-13	dB	-11	dB
Perdite da impostare nel link ottico per avere il segnale necessario in uscita dal remotizzatore	9	dB	11	dB

BTS indica il valore del segnale radio (valutato in dBm) prodotto dalla BTS stessa e da irradiare tramite antenna; la potenza dell'apparato palmare corrisponde invece al livello del segnale espresso in dBm effettivamente irradiato. Le sensibilità di BTS e apparato palmare corrispondono al livello minimo del segnale radio che può essere ricevuto.

indicati Operatore 1 e Operatore 2; altri riguardano i materiali utilizzati nell'impianto come le attenuazioni dei cavi coassiali, radianti, in fibra ottica, ecc.

Si riportano infine i dati caratteristici della stazione di testa e dei remotizzatori per "Down-Link" e per "Up-Link" (tabelle 3, 4, 5, 6 e 7).

A questo punto si può procedere

TABELLA 8

CALCOLO DEL RAPPORTO SEGNALE/RUMORE "DOWN-LINK"

Calcolo del rapporto segnale/rumore C/N	Operatore 1		Operatore 2	
<i>Stazione di testa (SdT)</i>				
KTb	-121	dBm	-121	dBm
Figura di rumore F	7	dB	16	dB
Rumore N=KTbF	-114	dBm	-105	dBm
Rapporto C/N uscita SdT	51	dB	61	dB
<i>Remotizzatore 1</i>				
Figura di rumore F remotizzatore	5	dB	5	dB
Figura di rumore F della Stazione di Testa + remotizzatore	12,6	dB	28,4	dB
Rapporto C/N uscita SdT+ remotizzatore 1	45,4	dB	48,6	dB
<i>Remotizzatore 2</i>				
Figura di rumore F remotizzatore	5	dB	5	dB
Figura di rumore F della Stazione di Testa + remotizzatore	12,6	dB	28,4	dB
Rapporto C/N uscita SdT+ remotizzatore 1	45,4	dB	48,6	dB

Gli altri parametri come il livello minimo del segnale in galleria sono dettati dalla specifica tecnica della radiopropagazione Rif. 1.

Successivamente sono presi in considerazione i dati generali di impianto (tabella 2): alcuni dati sono tipici della galleria come la lunghezza, il livello del segnale GSM dei due Operatori di telefonia mobile presenti agli imbocchi e che nel seguito saranno

con il dimensionamento vero e proprio detto anche "Link Budget".

Il fine del "Link Budget Down-Link" consiste nel dimensionare le impostazioni di ciascun apparato affinché il segnale propagato in galleria nel punto peggiore (generalmente in fondo al cavo radiante) raggiunga comunque un valore minimo superiore a quello di soglia impostato da specifica e pari a -78dBm.

Nel calcolo del "Link Budget Down-Link" vengono presi in considerazione i segnali GSM realmente presenti all'imbocco e nel caso della Annunziata Lunga è stato riscontrato il livello del segnale di un Operatore (Operatore 2) molto maggiore rispetto al livello dell'altro Operatore (Operatore 1). Questo implica una diversa impostazione nel guadagno della stazione di testa e in particolare del sottosistema chiamato moduli di banda. Infatti il modulo di banda Operatore 1 dovrà amplificare maggiormente il segnale rispetto a quello Operatore 2, affinché i segnali in uscita dalla stazione di testa abbiano livelli paragonabili.

Alla stazione di testa è connesso uno spezzone di cavo radiante e nella tabella 5) è indicata l'attenuazione

## GALLERIE

TABELLA 9

CALCOLO DEL RAPPORTO SEGNALE/INTERMODULAZIONE  
“DOWN-LINK”

Calcolo del rapporto C/I Segnale/Intermodulazione in condizione di carico limite	Operatore 1		Operatore 2	
<i>Stazione di Testa (SdT)</i>				
IP3 Stazione di Testa	60	dB	60	dB
Numero di portanti	9		9	
Piling factor	18,1	dB	18,1	dB
Rapporto C/I uscita SdT	69,9	dB	65,9	dB
Intermodulazione massima Stazione di Testa	-53,9	dBm	-47,9	dBm
<i>Remotizzatore 1 con SdT</i>				
IP3 remotizzatore	60	dB	60	dB
IP3 della Stazione di Testa + remotizzatore	59,9	dB	59,9	dB
Numero di portanti	36		36	
Piling factor	30,9	dB	30,9	dB
C/I primo remotizzatore	56,8	dB	56,8	dB
Intermodulazione massima SdT+ remotizzatore 1	-40,7	dBm	-40,7	dBm
<i>Remotizzatore 2 con SdT</i>				
IP3 remotizzatore	60	dB	60	dB
IP3 della Stazione di Testa + remotizzatore	60	dB	60	dB
Numero di portanti	36		36	
Piling factor	30,9	dB	30,9	dB
C/I primo remotizzatore	56,8	dB	56,8	dB
Intermodulazione massima SdT+ remotizzatore 1	-40,7	dBm	-40,7	dBm

TABELLA 10

IMPOSTAZIONI DELLA STAZIONE DI TESTA “UP-LINK”

Stazione di testa	Operatore 1		Operatore 2	
Potenza trasmessa da telefono palmare	33	dBm	33	dBm
Attenuazione carrozza	20	dB	20	dB
Sensibilità BTS	-104	dBm	-104	dBm
Margine alla BTS	4	dB	4	dB
Guadagno antenna in trasmissione TX	16,5	dB	16,5	dB
Livello del segnale minimo alla BTS	-102	dBm	-102	dBm
Attenuazione di tratta fino alla BTS (compresa antenna BTS)	120	dB	101	dB
System loss cavo radiante + cavo connessione	88,1	dB	88,1	dB
Perdite tra antenna verso BTS e stazione di testa	2,5	dB	2,5	dB
Segnale minimo in uscita dalla stazione di testa	4	dBm	-15	dBm
Segnale minimo in ingresso alla stazione di testa	-75,1	dBm	-75,1	dBm
Guadagno alla stazione di testa	79	dB	60	dB

TABELLA 11

IMPOSTAZIONI DEL PRIMO REMOTIZZATORE “UP-LINK”

Remotizzatori interni Primo remotizzatore	Operatore 1		Operatore 2	
System loss cavo radiante più lungo + codino	87,6	dB	87,6	dB
Perdite splitter	3,5	dB	3,5	dB
Segnale necessario in ingresso al remotizzatore	-78,1	dBm	-78,1	dBm
Path ottico				
Perdite per sezione di combinazione	29,7	dB	29,7	dB
Perdite dovute al collegamento in fibra ottica	2,8	dB	2,8	dB
Guadagno del remotizzatore	40	dB	40	dB
Perdite da impostare nel link ottico	7	dB	7	dB

TABELLA 12

IMPOSTAZIONI DEL SECONDO REMOTIZZATORE “UP-LINK”

Remotizzatori interni secondo remotizzatore	Operatore 1		Operatore 2	
System loss cavo radiante più lungo + codino	87,6	dB	87,6	dB
Perdite splitter	3,5	dB	3,5	dB
Segnale necessario in ingresso al remotizzatore	-78,1	dBm	-78,1	dBm
Path ottico				
Perdite per sezione di combinazione	29,7	dB	29,7	dB
Perdite dovute al collegamento in fibra ottica	4,2	dB	4,2	dB
Guadagno del remotizzatore	40	dB	40	dB
Perdite da impostare nel link ottico	5	dB	5	dB

dei vari componenti per arrivare al “system loss” cioè alla perdita introdotta dal sistema radiante. Viene valutato il valore di minimo del segnale esteso che si ha in fondo al cavo fessurato. Come si evince dalla tabella 5 tale valore è maggiore del limite di -78dBm in galleria (tale limite è previsto per applicazione di mobili con antenna

esterna fuori dal treno) e garantisce un sufficiente margine di sensibilità al mobile anche all'interno di una carrozza con una attenuazione pari a 20 dB (generalmente le carrozze dei treni Inter City hanno una attenuazione di 15 dB circa e quelle degli Eurostar ETR500 una attenuazione media di 20dB).

Analogamente viene impostato il guadagno dei remotizzatori ottici affinché sia garantito in galleria il segnale minimo previsto da specifica.

Dopo il dimensionamento basato sul livello del segnale si procede a verificare se i parametri di sistema legati alla qualità del segnale stesso in termini di rapporto segnale/ru-more e segnale/intermodulazione sono garantiti.

TABELLA 13

CALCOLO DEL RAPPORTO SEGNALE/RUMORE "UP-LINK"

Calcolo del rapporto segnale/rumore C/N	Operatore 1		Operatore 2	
<i>Stazione di Testa (SdT)</i>				
KTb	-121	dBm	-121	dBm
Figura di rumore F	14	dB	22	dB
Rumore N=KTbF	-107	dBm	-99	dBm
Segnale minimo in ingresso SdT	-75,1	dBm	-75,1	dBm
Rapporto C/N minimo	31,9	dBm	23,9	dBm
Potenza di rumore in uscita da SdT dovuta alla parte RF	-27,9	dBm	-38,9	dBm
<i>Remotizzatori</i>				
Rumore in ingresso KTb	-121	dBm	-121	dBm
Figura di rumore F per singolo remotizzatore	7	dB	7	dB
Rumore NKTb	-114	dBm	-114	dBm
Figura di rumore F della Stazione di Testa + remotizzatori	13,5	dB	13,5	dB
Rumore NKTb SdT+ remotizzatori	-107,5	dBm	-107,5	dBm
Potenza di rumore in uscita da SdT totale	-28,4	dBm	-47,4	dBm
Rapporto C/N uscita SdT	32,4	dB	32,4	dB
Potenza di rumore ricevuta dalla BTS	-134,4	dBm	-134,4	dBm

Come si evince dalla tabella 8) il calcolo del rapporto segnale/rumore va eseguito per ciascun apparato dell'impianto (stazione di testa e remotizzatori) per verificare che vengano rispettati i valori limite di specifica Rif. 1.

Particolare importanza assume il calcolo del segnale/intermodulazione in condizione di carico limite inteso come numero di portanti radio (segnali radio a distinte frequenze). La specifica Rif. 1 impone la verifica dell'efficienza degli apparati nella configurazione con 36 portanti radio estese. Tale configurazione è molto stressante per le caratteristiche degli apparati e permette di valutarne la bontà in termini di affidabilità e qualità (interferenza per intermodulazione) nel caso venissero estesi a tre o quattro operatori GSM/GSM-R.

Come per il caso "Down-Link" il fine del calcolo del "Link Budget Up-

Link" consiste nel dimensionare le impostazioni di ciascun apparato affinché il segnale trasmesso dal mobile in galleria nel punto peggiore (generalmente in fondo al cavo radiante) venga ricevuto dalla stazione di testa, attraverso i cavi radianti e remotizzatori, con un livello sufficiente affinché possa essere amplificato, trasmesso e ricevuto dalla cella donatrice entro i limiti di sensibilità della BTS.

Le tabelle 10, 11, 12, 13, e 14 riportano il dimensionamento per il "Link Budget UP-Link" sulla stessa impostazione del percorso "Down-Link".

Dopo l'attivazione dell'impianto della galleria Annunziata Lunga è stata condotta una campagna di misure radioelettriche per valutare l'efficienza dell'impianto stesso.

TABELLA 14

CALCOLO DEL RAPPORTO SEGNALE/INTERMODULAZIONE "UP-LINK"

Calcolo del rapporto C/I Segnale/Intermodulazione in condizione di carico limite	Operatore 1		Operatore 2	
<i>Stazione di Testa (SdT)</i>				
IP3 Stazione di Testa	60	dB	60	dB
Potenza di uscita dalla SdT	4	dBm	-15	dBm
Numero di portanti	9		9	
Piling factor	18,1	dB	18,1	dB
Rapporto C/I della parte RF	93,9	dB	131,9	dB
Prodotto di Intermodulazione massima Stazione di Testa derivante dalla parte RF	-89,9	dBm	-146,9	dBm
<i>Remotizzatore 1 con SdT</i>				
IP3 remotizzatore	40	dB	40	dB
Numero di portanti	9		9	
Piling factor	18,1	dB	18,1	dB
IP3 della Stazione di Testa + remotizzatore	59,9	dB	54,6	dB
C/I della catena remotizzatore + SdT	93,7	dB	121,2	dB
Prodotto di Intermodulazione massimo in uscita da SdT	-89,7	dBm	-136,2	dBm
<i>Remotizzatore 2 con SdT</i>				
IP3 remotizzatore	40	dB	40	dB
Numero di portanti	9		9	
Piling factor	18,1	dB	18,1	dB
IP3 della Stazione di Testa + remotizzatore	59,9	dB	55,1	dB
C/I della catena remotizzatore + SdT	93,7	dB	122,2	dB
Prodotto di Intermodulazione massimo in uscita da SdT	-89,7	dBm	-137,2	dBm

## 9. Misure radioelettriche

Le misure di seguito riportate sono state effettuate con un apposito banco radio costituito da telefoni GSM Sagem OT96R collegati a un PC munito di software Netprobe (COM-TEST). Questo programma registra tutti i parametri misurati/rilevati dai telefoni, prelevando un campione ogni mezzo secondo circa (in corrispondenza del messaggio periodico "SACCH" Slow Associated Control Channel). Le misure quindi, sia per la scarsa numerosità dei campioni acquisiti che per la mancanza di riferimenti spaziali certi (odometro), sono da ritenersi puramente qualitative.



### Galleria Annunziata Lunga (6.671m) - impianto in derivazione ottica

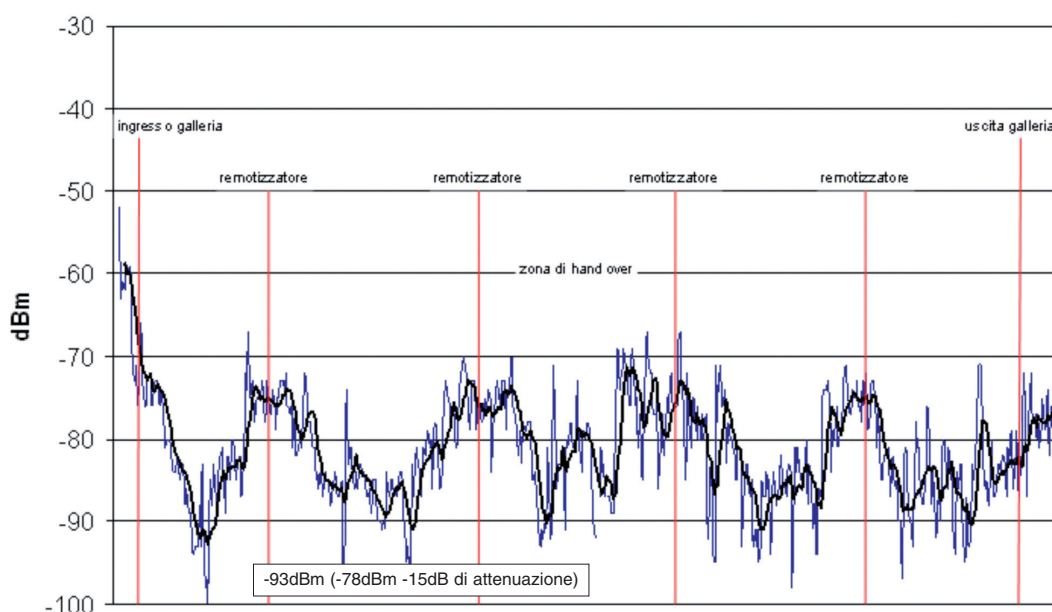


Fig. 14 – Livello del segnale radio misurato in galleria a bordo di un treno regionale con antenna all'interno della carrozza (attenuazione di 15dB).

Ciononostante, offrono un'ottima indicazione sul funzionamento degli impianti.

La misura è stata condotta con il banco radio posizionato all'interno di un normale treno regionale (antenna del mobile all'interno del treno) e quindi con una attenuazione di carrozza pari a circa 15dB (valore misurato comunemente). È interessante osservare il rispetto del vincolo più stringente ai fini della copertura radio e cioè il livello di campo elettromagnetico minimo richiesto di -78 dBm; considerando l'attenuazione di carrozza di 15 dB nella figura è evidenziata la soglia minima pari a -93dBm ottenuta aggiungendo al valore di -78dBm l'attenuazione suddetta (15dB) (fig. 14).

Si riportano a titolo di esempio altre misure eseguite in gallerie con diverse tipologie di impianti sempre con lo stesso banco di misura

per evidenziare le prestazioni in galleria del segnale GSM esteso.

#### 10. Impianto con antenna di copertura

Come esempio di impianto realizzato con antenna di copertura, viene presentata la misura effettuata all'interno della galleria "Cava" (338m) della linea non elettrificata a singolo binario Sulmona-Carpinone (fig. 15).

La misura è stata effettuata sul pianale di

un carrello ferroviario, all'esterno della cabina, in condizioni quindi assimilabili all'utilizzo di un'antenna esterna.

L'antenna di copertura è installata all'interno della galleria, sulla som-

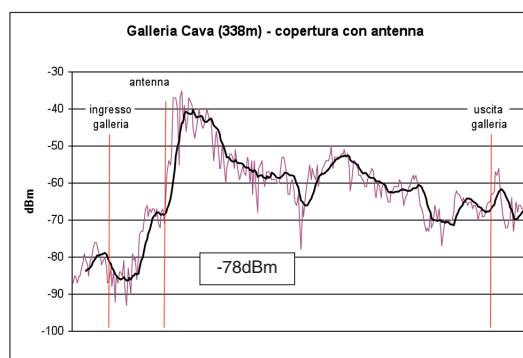


Fig. 15 – Livello del segnale radio misurato in galleria a bordo di un carrello ferroviario con antenna esterna alla cabina (nessuna attenuazione).

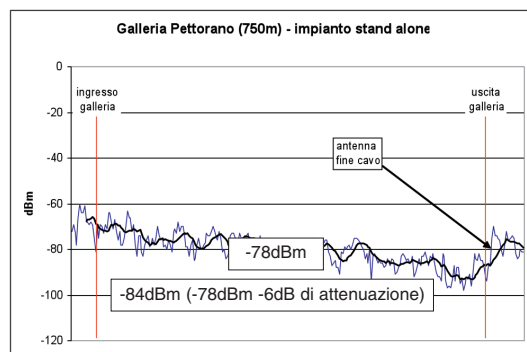


Fig. 16 – Livello del segnale radio misurato in galleria a bordo di un carrello ferroviario con antenna interna alla cabina (attenuazione di 6dB).

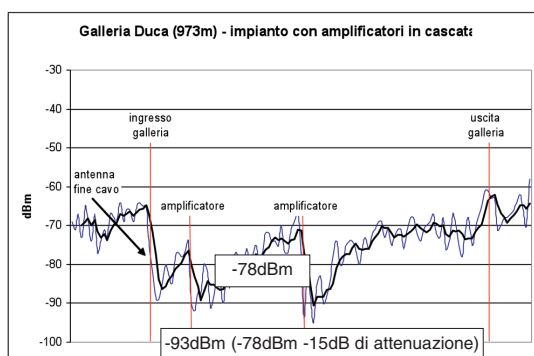


Fig. 17 – Livello del segnale radio misurato in galleria a bordo di un treno regionale con antenna all'interno della carrozza (attenuazione di 15dB).

mità della volta, ad alcune decine di metri dall'imbocco per garantire un adeguato disaccoppiamento con l'antenna della stazione di testa diretta verso i siti radio degli Operatori di telefonia mobile. Si osserva l'effetto del lobo posteriore, il brusco innalzamento del livello in corrispondenza del lobo principale e l'andamento rapidamente decrescente all'aumentare della distanza dall'antenna.

## 11. Impianto con singolo spezzone di cavo radiante ("stand alone")

Come esempio di impianto "stand-alone", viene presentata la misura ef-

fettuata all'interno della galleria "Pettorano" (750m) della linea non elettrificata a singolo binario Sulmona-Carpinone.

La misura è stata effettuata all'interno della cabina di un carrello ferroviario con una attenuazione media di 6 dB. La soglia di copertura imposta dalla specifica suddetta pari a -78dBm (valore di minimo del segnale GSM) includendo i 6dB di attenuazione di carrozza corrisponde in questo caso a -84dBm (fig. 16).

Si nota distintamente l'andamento dolcemente decrescente del livello, a causa dell'attenuazione del cavo radiante, e il picco in corrispondenza dell'antenna di fine cavo.

## 12. Impianto con amplificatori in cascata

Come esempio di impianto con amplificatori in cascata (fig. 17), viene presentata la misura effettuata all'interno della galleria "Duca" (973m) della linea elettrificata a singolo binario Roma-Sulmona.

La misura è stata effettuata all'interno di una carrozza ferroviaria di un treno regionale con un'attenuazione di circa 15 dB. La soglia di copertura imposta dalla specifica suddetta pari a -78dBm (valore di minimo del segnale GSM) includendo i

15dB di attenuazione di carrozza corrisponde in questo caso a -93dBm.

Si distinguono il picco dell'antenna di fine cavo, gli aumenti di livello in corrispondenza degli amplificatori e in definitiva il tipico andamento a "dente di sega".

(Nota: la misura è stata effettuata partendo da fine cavo e risalendo verso la stazione di testa)

## 13. Conclusioni e prospettive

L'esperienza maturata negli anni nell'ambito della progettazione e realizzazione di impianti di radiopropagazione in galleria sulla rete FS consente di progettare e realizzare i nuovi impianti con caratteristiche sempre più performanti ed efficienti in termini di propagazione del segnale radio e qualità del servizio verso l'utente finale.

Le difficoltà incontrate nella realizzazione degli impianti e la manutenzione periodica degli stessi ha permesso nel tempo di considerare più vantaggiosa la tipologia di impianto in derivazione ottica, avvalorando la scelta anche in funzione della qualità della copertura radio ottenuta. Pertanto i nuovi impianti, per quanto possibile, sono progettati con amplificatori ottici.

Nel settore della telefonia mobile si stanno sempre più sviluppando e affermando nuove tecnologie che oltre alle comunicazioni voce prevedono le comunicazioni dati. Se oltre all'evoluzione tecnologica si tiene in considerazione anche il riassetto delle frequenze in banda GSM previsto in più fasi (e di fatto già iniziato), si comprende come i futuri impianti di "estensione" in galleria subiranno delle evoluzioni. Per tutti questi motivi i nuovi impianti sono progettati secondo i criteri esposti nel presente articolo, che sono alla base della radiopropagazione, ma contemporaneamente, nei limiti del possibile, vengono già predisposte le infrastrutture, in particolare cavi a fibra ottica e alimentazione in galleria, per poter essere riutilizzate da eventuali nuove tecnologie.