

TAV: la Televisione ad Alta Velocità

Aspetti realizzativi per distribuire la TV digitale a bordo di treni ad alta velocità

Andrea Bertella, Vittoria Mignone, Silvio Ripamonti,
Bruno Sacco, Mirto Tabone e Giovanni Vitale
Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica

Giuseppe Braccini,
Rai Way

Sommario

I treni ad alta velocità sono utilizzati molto spesso come uffici viaggianti; in molti casi il viaggio in treno è vissuto come un momento di relax, così come accade durante gli spostamenti aerei. Qualunque sia lo stile del nostro viaggio, il poter accedere a contenuti TV live informativi o di intrattenimento rappresenta senza dubbio un arricchimento notevole dei servizi offerti a bordo. Il Centro Ricerche della Rai ha realizzato, su richiesta di RaiWay, uno studio di fattibilità per un sistema che fornisca un servizio di ricezione TV e radio digitale con programmi Rai a bordo dei treni ad alta velocità.

1. INTRODUZIONE

La concorrenza nel settore del trasporto ferroviario ad alta velocità ha stimolato la ricerca, anche da parte dei nuovi operatori, di servizi innovativi che arricchiscano l'offerta ai viaggiatori.

In questo contesto Rai Way S.p.A., la società del gruppo Rai che possiede e gestisce le infrastrutture di trasmissione e diffusione del segnale radiotelevisivo e che sta svolgendo un ruolo primario nel passaggio al digitale terrestre televisivo, ha individuato una interessante opportunità per valorizzare il proprio know-how la cui eccellenza viene riconosciuta anche in ambito internazionale.

L'idea consiste nell'estendere il servizio radiotelevisivo, nella sua nuova veste digitale, anche ai

viaggiatori in treno, che potranno così trascorrere il tempo di viaggio in maniera rilassata, come se fossero sul divano di casa propria potendo fruire, in real time, di news, eventi sportivi e programmi di intrattenimento.

Il servizio si andrebbe ad aggiungere agli altri servizi digitali (telefonia e broadband) già disponibili a bordo dei treni, ed in via di potenziamento, destinati maggiormente ad un'utenza di tipo business.

Su questo tema è stata pertanto elaborata dal Centro Ricerche Rai, su richiesta e in collaborazione con l'unità organizzativa Sviluppo Business di Rai Way, una ipotesi di soluzione ad alto contenuto di innovazione che integra sinergicamente collaudate tecnologie già impiegate nel settore del digitale terrestre televisivo.

2. RISULTATI DEGLI STUDI PRECEDENTI

Il progetto FIFTH [1], a cui ha partecipato il Centro Ricerche e si è concluso nel 2003, ha studiato la possibilità di distribuire programmi televisivi su treni ad alta velocità. La soluzione da esso proposta consiste nell'aggiungere un segnale dedicato da satellite, con due caratteristiche:

- basso bitrate, per minimizzare il costo del satellite,
- contenente due flussi gemelli, ma sfalsati di 10 minuti.

Grazie alla seconda caratteristica, il primo flusso ricevuto è memorizzato in un buffer, mentre il secondo flusso è quello normalmente distribuito all'utente. In caso di interruzioni (ostacoli brevi o anche gallerie più o meno lunghe) nel buffer di ricezione è comunque presente la replica e si può così avviare alla mancanza di dati. Ciò implica che le gallerie devono essere percorse in meno di 10 minuti, in caso contrario viene a mancare il contributo sostitutivo offerto dalla **diversity temporale**.

Il sistema sopra citato soffre di alcuni limiti:

- ⊖ scarsa offerta di programmi (ne è previsto uno solo in caso di ricezione comunitaria, e quattro in caso di ricezione individuale);
- ⊖ limitata qualità video;
- ⊖ costi di gestione per l'affitto del transponder satellitare (in realtà è utilizzata una frazione della capacità del transponder per ridurre il costo).

3. OBIETTIVI E VINCOLI PER IL NUOVO STUDIO

L'obiettivo iniziale di questo studio consiste nell'individuare soluzioni atte a fornire agli utenti sui treni ad alta velocità la ricezione, collettiva e individuale, di programmi televisivi e radiofonici con un'offerta ampia, e qualità video comparabile a quella di una ricezione fissa domestica, senza ulteriori spese per l'affitto di segmenti satellitari.

Questo studio di fattibilità ha lo scopo di confrontare le possibili soluzioni con quella considerata in FIFTH

Acronimi e sigle

ASI-TS	Asynchronous Serial Interface - Transport Stream
AVC	Advanced Video Coding, nota anche come H.264
CRC	Cyclic Redundancy Check
DVB	Digital Video Broadcasting
FEC	Forward Error Correction
FIFTH	Fast Internet for Fast Trains Hosts
GSM-R	Global System for Mobile Communications - Railway
IP	Internet Protocol
MPE-FEC	Multi Protocol Encapsulation - FEC
SCPC	Single Channel Per Carrier
TS	Transport Stream

e valutarle dal punto di vista costi/benefici, anche in funzione dei requisiti più o meno stringenti presi in considerazione.

3.1 COPERTURA

Il servizio dovrebbe essere operante lungo tutta la linea ferroviaria percorsa dai treni interessati:

- le tratte a cielo aperto, servite dal segnale satellitare;
- le tratte in galleria;
- il transito e la sosta nelle principali stazioni.

3.2 INTEGRAZIONE CON SERVIZI ESISTENTI

L'infrastruttura di bordo e quella fissa in galleria devono integrarsi per quanto possibile con gli impianti esistenti:

- A bordo del treno esistono precisi vincoli: di dimensioni e di assorbimento per gli apparati; vincoli geometrici e meccanici per antenne e cablaggi; le interconnessioni tra i vagoni dovrebbero essere evitate.
- In galleria esistono strutture radianti a larga banda (cavi fessurati) per applicazioni GSM-R. Gli apparati potranno condividere tali strutture e quindi integrarsi con i relativi impianti.

4. APPROCCIO "BOUQUET ESISTENTE"

4.1 REQUISITI DEL SERVIZIO

Nell'ottica di fornire all'utente un'offerta ampia, compatibilmente con costi e complicazione dell'infrastruttura, si pensa di utilizzare parte del bouquet TivùSat. Un esempio di programmi televisivi possibili candidati è indicata in tabella 1. Con tale scelta i transponder da ricevere sono 4 per ottenere 8 programmi TV, oppure 3 per ottenerne 7. Nel primo caso, tuttavia, si otterrebbero anche, ad esempio, i 4 programmi radiofonici Rai indicati in tabella 2.

4.2 ARCHITETTURA DI RIFERIMENTO

Sulla base dei requisiti di progetto precedentemente introdotti è stata ideata da Rai Way l'architettura illustrata in figura 1.

A bordo del treno si tratta di ridistribuire i programmi televisivi e radiofonici, ricevuti ad esempio dalla piattaforma satellitare di TivùSat, tramite lo standard

Programma televisivo	Mux Sat
RaiUno	D 10.992 V Mediaguard/Nagravision 3
RaiDue	
RaiTre	
Rai News 24	D 11.804 V
Rete 4	D 11.919 V Mediaguard 2/Nagravision 3
Canale 5	
Italia 1	
La 7	D 11.541 V Nagravision 3

Tab. 1 - Un esempio di programmi televisivi candidati alla distribuzione sui treni ad alta velocità.

Programma radio	Mux Sat
Radio 1	D 11.804 V
Radio 2	
Radio 3	
Isoradio	

Tab. 2 - Un esempio di programmi radiofonici, fra quelli presenti nel bouquet TivùSat.

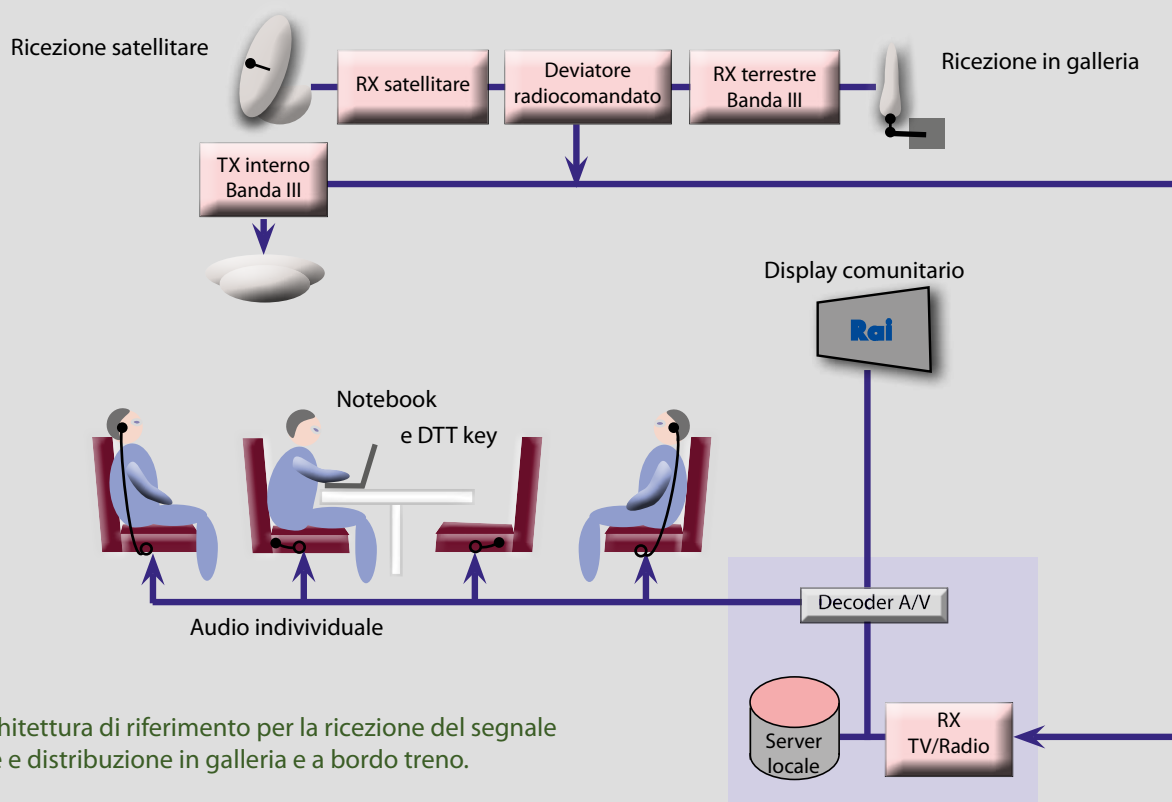


Fig. 1 - Architettura di riferimento per la ricezione del segnale da satellite e distribuzione in galleria e a bordo treno.

la Televisione ad Alta Velocità

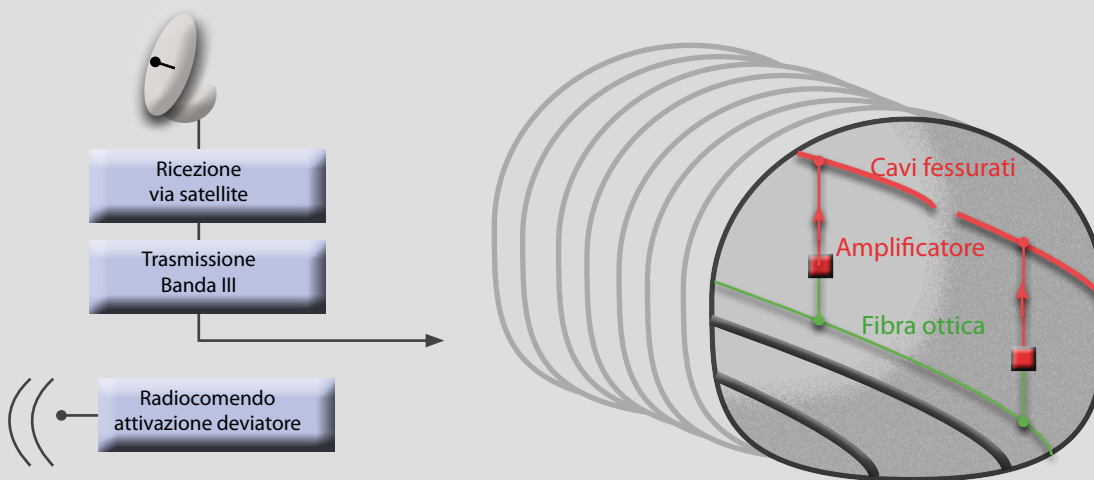


Fig. 2 - Distribuzione del segnale DVB-T in galleria..

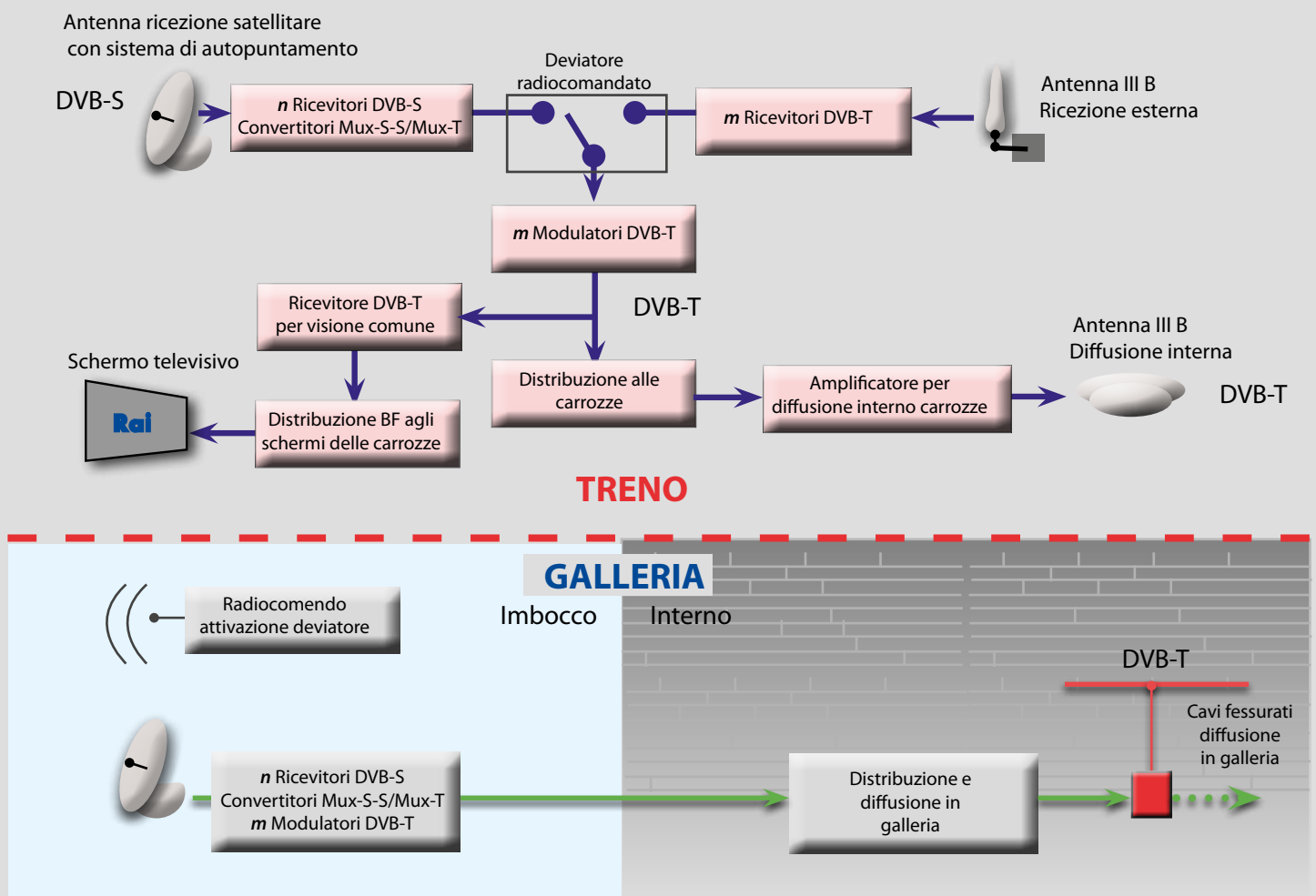


Fig. 3 - Schema dettagliato della distribuzione del segnale DVB-T in galleria e commutazione del segnale.

DVB-T [2, 3] mediante un trasmettitore a bassissima potenza (banda III) (figura 2). Quando il treno si trova a transitare in campo libero i programmi televisivi sono ricevuti dal satellite da n transponder e riposizionati su m blocchi DVB-T (nell'ipotesi di partenza $n=8, m=8$).

In galleria la continuità di trasmissione a bordo treno verrebbe garantita da una ritrasmissione dello stesso segnale con la medesima modalità DVB-T in cavo radiante (fessurato); gli spezzoni di cavo radiante (di circa 550+550 m) sono alimentati amplificando un segnale distribuito su fibra ottica generato all'imbocco della stessa.

In prossimità della galleria, in ingresso ed in uscita, un radiocomando di prossimità fornirebbe il comando di passaggio dalla modalità satellite alla modalità galleria e viceversa. In figura 3 è rappresentato lo schema funzionale degli apparati.

4.3 ASPETTI REALIZZATIVI E CRITICITÀ

Segue una rassegna dei potenziali problemi e implicazioni relativi alla realizzazione.

4.3.1 DOWNLINK SATELLITE

La tecnologia DVB-S appare un'ottima candidata. Tuttavia esistono criticità relative ai seguenti aspetti:

- **Antenna:** è richiesto un sofisticato sistema d'antenna con puntamento e inseguimento (*tracking*) automatico. Tecnicamente il problema è già stato affrontato ed è disponibile un prodotto già collaudato. Per quanto riguarda la singola antenna (come si vedrà, in realtà risulterebbe necessaria una coppia di antenne per ogni treno), la criticità è relativa alla sistemazione meccanica e al costo.
- **Effetto Doppler:** l'antenna richiesta è sufficientemente direttiva da escludere la presenza di *multipath* (riflessioni da ostacoli) con effetto Doppler. L'effetto Doppler presente è relativo al solo segnale diretto, per il movimento reciproco tra satellite e treno. Nell'analisi eseguita nel progetto FIFTH è considerato l'utilizzo di un sistema di compensazione per l'effetto Doppler.
- **Blocking e Shadowing:** dovuto a ostacoli: anche su questi aspetti l'analisi fatta nel progetto FIFTH è approfondita e circostanziata da prove su campo. Un supplemento di prove di laboratorio è stato recentemente eseguito dal Centro Ricerche, per valutare qual'è la massima durata della microinterruzione tollerata dal sistema DVB-S [4], e l'influenza della frequenza di ripetizione dell'evento. I dettagli sono riportati in appendice A. In buona sostanza comunque si evince che l'estensione della microinterruzione è dell'ordine dei centimetri (con treno in corsa). Potenzialmente quindi ostacoli anche piccoli possono causare problemi.

Si conclude, in accordo con i risultati di FIFTH, che in assenza di ulteriori contromisure la (singola) ricezione satellite non è in grado di garantire il servizio in presenza di microinterruzioni dovute ai tralicci che sostengono la linea di alimentazione. Altri tipi di ostacoli (alberi, pali, ponti, ...), per quanto più sporadici, causano analoghe microinterruzioni.

Le contromisure includono:

1. **Diversity di spazio:** occorrono due antenne e relativi ricevitori: i segnali ottenuti vengono commutati (sistema più semplice) o combinati (più complicato perché richiede la messa in fase dei segnali, che potrebbe risultare critica) per ottenere un segnale ridondato. La protezione ottenibile è tanto maggiore (in termini di estensione della zona d'ombra) quanto più distanti sono le due antenne. Le possibilità sono:
 - Antenne montate sullo stesso vagone (es. motrice di testa): la protezione ottenibile è un po' inferiore, in quanto ponti larghi (e ostacoli simili) possono mettere in ombra entrambe le antenne contemporaneamente, ma il cablaggio risulta molto semplificato.
 - Antenne montate su carrozze distanti (ad esempio, le due motrici, di testa e di coda): in questo caso la protezione è più elevata, ma il cablaggio si complica molto in quanto i segnali ricevuti devono essere convogliati in un unico punto per effettuare la commutazione e da qui la successiva distribuzione.

2. **Diversity di tempo:** Questo approccio non consente la compatibilità con il segnale DVB/S ed è analizzato nella sezione 5.
3. **Interleaving di tempo:** consiste nell'inserire un buffer di dati (*time deinterleaver*) sufficientemente grande: l'interruzione causa la perdita di dati, ma se i dati persi sono una percentuale ragionevolmente piccola di quelli contenuti nel buffer, un potente codice a correzione d'errore può recuperare i dati persi. Purtroppo questo metodo richiede un buffer gemello e inverso in trasmissione ("time interleaver") e ciò non è fattibile, se come requisito si richiede che l'head-end di trasmissione sia standard DVB/S, come quello TivùSat. Un approccio basato sull'uso della combinazione Time Interleaver e Upper Layer FEC, possibile adottando lo standard DVB/H, è analizzato nella sezione 6.

Fra le contromisure indicate, e adottando l'architettura di riferimento precedentemente esposta, l'unica possibile è la **diversity di spazio** (antenna diversity), purtroppo caratterizzata da un elevato costo.

4.3.2 GALLERIA (INSTALLAZIONI FISSE)

CAVO FESSURATO

Le gallerie sono attualmente già allestite con una distribuzione del segnale RF del servizio GSM-R,

tramite cavo fessurato. L'assunzione che tale cavo possa operare anche sulle bande televisive è ragionevole, sebbene sia da verificare, poiché dipende dal tipo di cavo posato.

La banda di frequenza candidata alla diffusione in galleria è la Banda III (174-230 MHz). Questa scelta è ragionevole, per minimizzare l'effetto Doppler.

Il segnale è distribuito in segmenti da 1100 m di cavo, alimentato al centro di ciascun segmento. Questa configurazione permette di ottenere una limitata attenuazione del segnale. Secondo stime ragionevoli l'attenuazione del cavo su 550 m si aggira intorno ai 7 dB, alle frequenze considerate. Di conseguenza, con il ricevitore in movimento, si può stimare una fluttuazione del livello del segnale di soli 7 dB. La ricezione in queste condizioni è stata analizzata nel corso del progetto FIFTH, traendo la conclusione che l'effetto Doppler è assente in quanto la ricezione è perpendicolare alla direzione del moto. In realtà il ricevitore raccoglie un'onda che si propaga sul cavo con una velocità che si somma/sottrae a quella del treno, quindi lo *shift* dovuto all'effetto Doppler è presente. In appendice A sono riportati procedura e risultati di test di laboratorio eseguiti per approfondire questo aspetto.

FIBRA OTTICA

La distribuzione in galleria degli m blocchi DVB-T richiede, in alternativa:

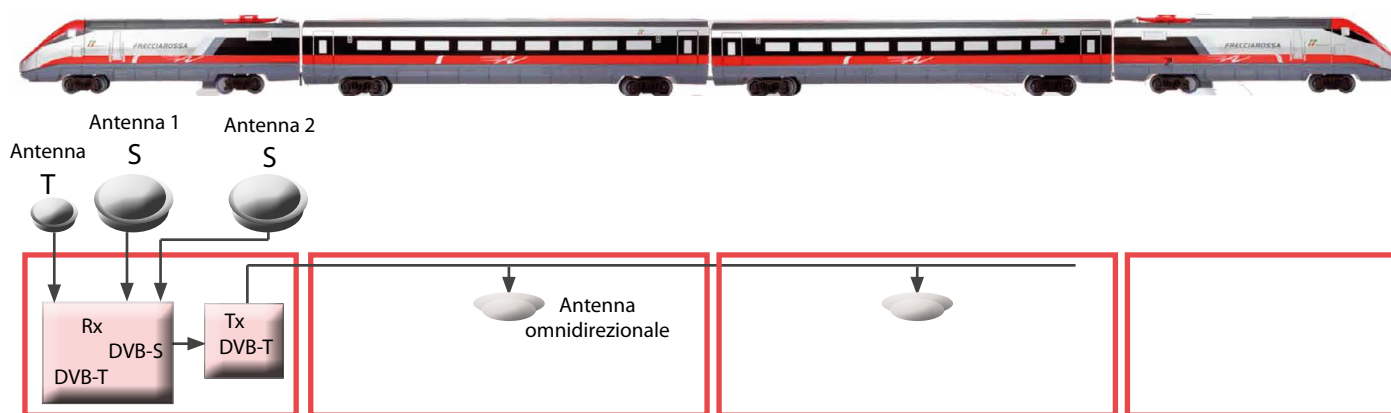


Fig. 4 - Distribuzione del segnale DVB/T a bordo treno utilizzando un cavo coassiale dedicato.

- un unico insieme di m modulatori DVB-T all'ingresso della galleria, quindi una distribuzione del segnale (banda III) su fibra ottica "analogica", dedicata esclusivamente a questo servizio,

oppure

- la distribuzione del *bitstream* completo ottenuto dalla ricezione satellite, su fibra "digitale", in eventuale condivisione con altri servizi, ai vari punti di alimentazione dei cavi fessurati. In questa ipotesi è necessaria, in ciascun punto, una batteria di m modulatori DVB-T. Se si opera questa scelta, dunque, si può risparmiare sulla fibra, ma i costi si moltiplicano a causa del numero di apparati installati.

DISTRIBUZIONE A BORDO DEL TRENO

Il segnale ricevuto (da satellite o da rete terrestre se in galleria), deve essere distribuito agli utenti, dotati di ricevitori DVB-T.

Nell'ipotesi che sia presente un cavo coassiale dedicato, posato per la lunghezza del treno, accessibile su ogni carrozza, la situazione è quella indicata in figura 4.

Il suddetto cavo viene utilizzato per distribuire il segnale fornito dal Tx DVB-T ad opportune antenne omnidirezionali posizionate sulle carrozze.

Nel caso in cui non sia previsto/possibile un cablaggio, si potrà considerare l'allestimento mostrato in figura 5.

La struttura è sostanzialmente una serie di *gap-filler* in cascata. E' importante massimizzare la distanza d_{TX-RX} tra l'antenna che riceve dal vagone precedente e l'antenna che trasmette verso gli utenti, come schematizzato in figura. Il segnale si degrada all'aumentare del numero dei *gap-filler*, tuttavia una struttura di questo tipo ha il vantaggio di non richiedere interconnessioni tra vagoni.

Da notare che il singolo vagone non deve essere "ruotato di 180 gradi".

5. APPROCCIO "TIME-DIVERSITY"

L'idea base è quella proposta nel progetto FIFTH, ovvero permettere la copertura nelle gallerie tramite la doppia trasmissione del segnale con il medesimo ritardato di, ad esempio, 10 minuti.

5.1 REQUISITI DEL SERVIZIO

Con questo approccio si perde la compatibilità con il segnale già presente su satellite (TivùSat). E' necessario dunque utilizzare un transponder dedicato, e questo comporta alti costi annui di utilizzo. I costi possono essere ridotti se si utilizza solo una parte

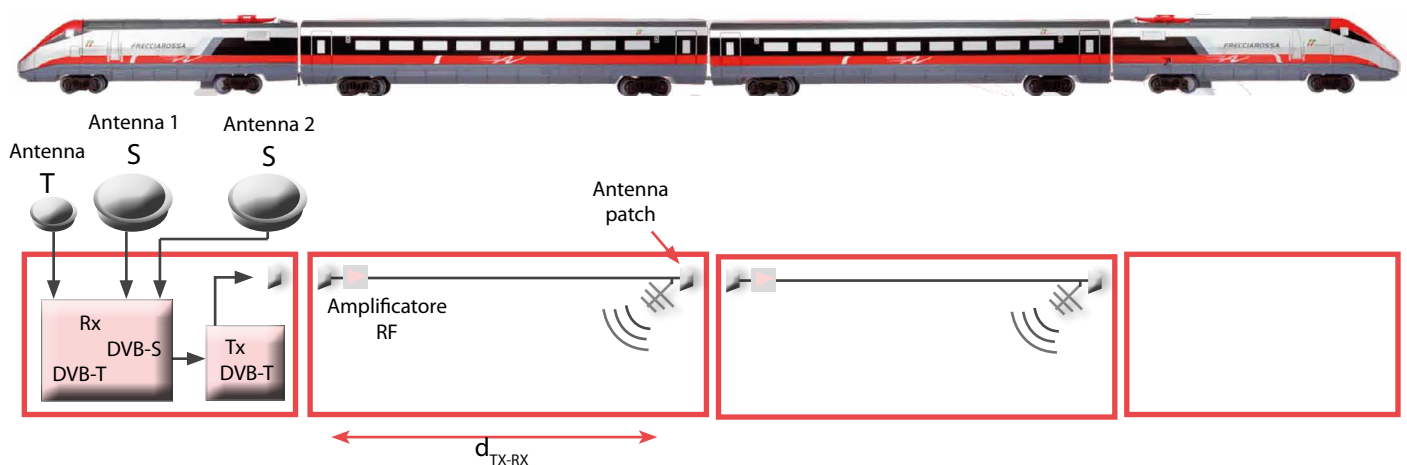


Fig. 5 - Distribuzione del segnale DVB/T a bordo treno, cavo coassiale dedicato non presente.

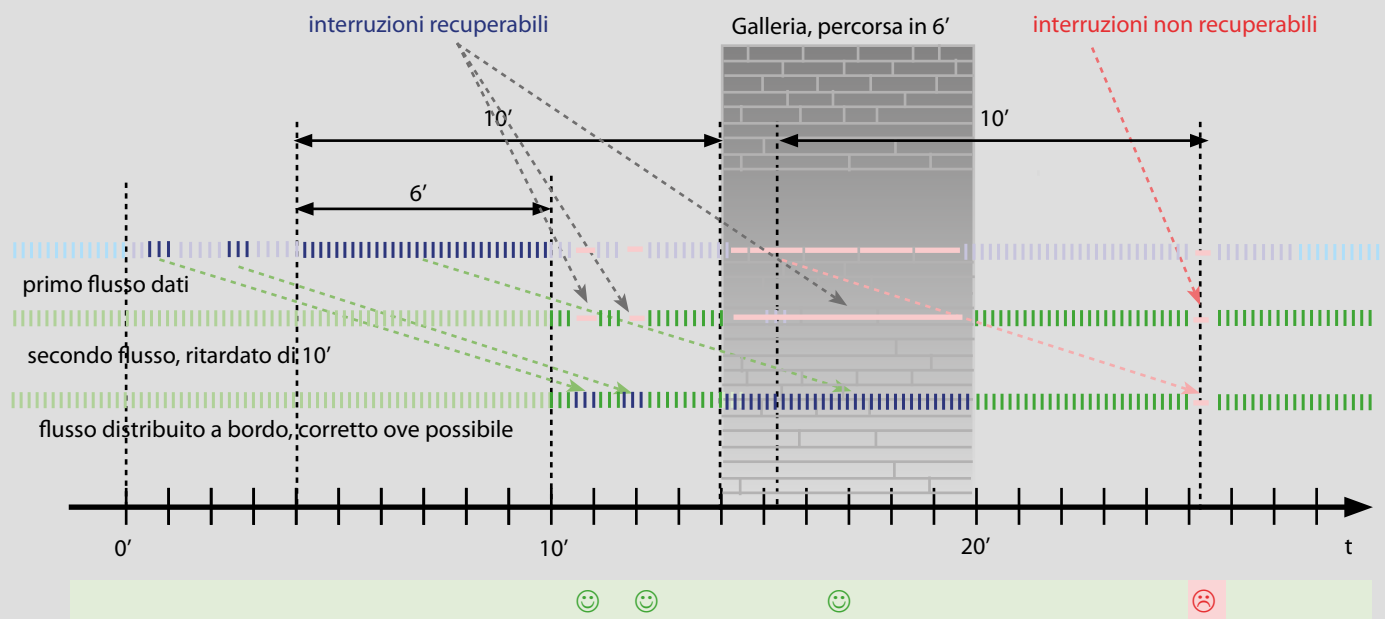


Fig. 6 - Schema di funzionamento dell'approccio Time Diversity. Il flusso dei dati è trasmesso dal satellite due volte: il secondo flusso, ritardato nell'esempio di 10 minuti, è quello distribuito, in condizioni normali, a bordo del treno. In caso di interruzioni (ostacoli brevi o gallerie più o meno lunghe) si utilizzano i dati ricevuti precedentemente, trasmessi con il primo flusso e memorizzati in un buffer. In questo esempio alcune interruzioni occasionali (prima della galleria) causano errori recuperabili grazie ai dati presenti nel buffer, lo stesso accade per la mancanza di segnale durante il percorso in galleria, nell'esempio dura 6 minuti, mentre l'interruzione successiva, seppur breve, non può essere corretta poiché non può essere sostituito con il segnale relativo al primo flusso dati, mancante a causa della galleria.

della capacità. Quindi l'offerta di programmi impatta direttamente sul costo. La qualità video inoltre è legata alla capacità del canale e quindi al costo. È evidente l'importanza della decisione se distribuire, ad esempio, un segnale a 0,5 Mbit/s piuttosto che un segnale a 5 Mbit/s.

5.2 ARCHITETTURA DI RIFERIMENTO

Vengono trasmessi, come già accennato, due flussi gemelli ma sfalsati di un certo tempo, supponiamo di 10 minuti. A bordo del treno il segnale fornito all'utente è quello ritardato.

In caso di interruzioni (ostacoli brevi o anche gallerie più o meno lunghe) nel buffer di ricezione è comunque presente la replica sfalsata del segnale che permette di ovviare alla mancanza di dati. Chiaramente il limite di funzionamento è di gallerie percorse in meno di 10 minuti, in caso contrario viene a mancare anche la **diversity temporale**.

In figura 6 sono evidenziati i casi di errori occasionali, di mancanza del segnale (durante il percorso in galleria), e di errori occasionali nella condizione in cui il segnale di *back-up* sia mancante perché, nell'esempio, una precedente galleria lo ha corrotto.

5.3 ASPETTI REALIZZATIVI E CRITICITÀ

Questa soluzione richiede, come già detto, un transponder dedicato.

Poiché prevede la trasmissione di programmi codificati ad-hoc^{Nota 1}, occorre tenere conto di N encoder e del multiplexer. Non avendo altri vincoli è però

Nota 1 - Prelevare programmi già codificati per altri mux, in modo da risparmiare sul costo degli encoder non è consigliabile in quanto, normalmente, i mux sono statistici; estrarre e affasciare programmi provenienti da mux diversi comporta un bit rate con fluttuazioni fuori controllo (a meno di non usare soluzioni tipo *Cherry Picker*, molto costose).

possibile e utile orientarsi verso schemi di modulazione più efficienti rispetto a quelli previsti da DVB-S, come quelli previsti da DVB-S2 [5].

Come accennato del paragrafo precedente questo metodo soffre di una sorta di "effetto memoria" nei minuti successivi alle gallerie (e comunque a qualsiasi tipo di ostacolo). Inoltre, come analizzato in precedenza, lungo la linea ferroviaria sono presenti i tralicci di sostegno dei cavi di alimentazione che provocano delle microinterruzioni del segnale che costituiscono circa lo 0,3% del tempo totale. Di conseguenza, in un percorso privo di gallerie è alquanto improbabile che, a distanza di 10 minuti, entrambi i segnali siano corrotti simultaneamente. Ne consegue che in questo caso la diversity temporale è efficace. Invece, in presenza di gallerie viene a mancare il segnale di *backup* e di conseguenza:

- in galleria resta il solo segnale ritardato, periodicamente corrotto dalla presenza delle microinterruzioni;
- nei minuti successivi all'uscita dalla galleria viene a mancare il segnale di *backup*, e quello ricevuto è periodicamente corrotto dalla presenza delle microinterruzioni.

Da quanto detto ne consegue che per garantire un servizio privo di malfunzionamenti così evidenti è necessaria la soluzione di **diversity spaziale** (antenna diversity).

DOWNLINK SATELLITE

Vale quanto già detto per la soluzione precedente, ma in questo caso, come accennato qui sopra, occorre l'antenna diversity.

GALLERIA

Vista la soluzione adottata non è più necessaria alcuna installazione per le gallerie.

DISTRIBUZIONE A BORDO DEL TRENO

Vale quanto già detto per la soluzione precedente.

6. ULTERIORI APPROCCI

La soluzione con antenna diversity, proposta per la ricezione DVB-S/S2 in presenza di microinterruzioni, è perfettamente funzionante dal punto di vista tecnico, ma risulta molto costosa in quanto su ogni treno il numero degli apparati di ricezione da satellite risulta praticamente raddoppiato.

Sono concepibili soluzioni alternative anche basate su standard consolidati.

6.1 MODULAZIONI CON TIME INTERLEAVER

Rimanendo nel novero degli standard già assestati appartenenti alla famiglia DVB, le possibilità sono due: DVB-H [6-8] e DVB-T2 [9-12]. Le implicazioni del loro utilizzo sono le seguenti:

- entrambi gli standard non sono concepiti per la trasmissione su satellite. Dunque:
 - la banda del segnale è compatibile con la canalizzazione terrestre (tipicamente 8 MHz). Su trasponder satellitare per avere capacità adeguata occorre inserire tre di questi segnali. Quindi il trasponder deve essere usato in modo SCPC (N segnali affiancati sullo stesso trasponder), e con un certo *back-off* aggiuntivo (5 dB può essere un valore indicativo, da ottimizzare). Questo valore erode della stessa quantità il margine di ricezione.
 - il DVB-T2 ha prestazioni migliori rispetto al DVB-H, grazie ai codici LDPC, quindi è più indicato per recuperare il margine eroso dal *back-off*.
- entrambi gli standard sono dotati di *time-interleaver* (Nota: Nel caso DVB-H, in realtà, si tratta di un FEC particolare con buffer di grandi dimensioni) capace di assorbire microinterruzioni di durata di molte decine di ms. Quindi sono più che adeguati per sopportare gli effetti dei tralicci e altri brevi ostacoli, anche a velocità più basse.
- apparati sono già disponibili commercialmente.

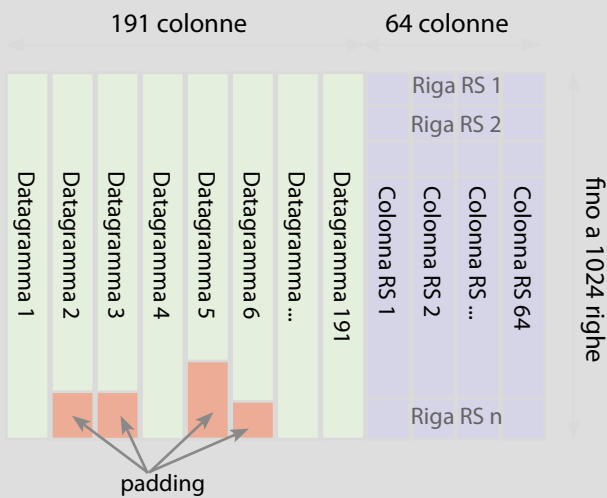


Fig. 7 - MPE-FEC nel DVB-H. E' un codice correttore di errori a livello di protocollo IP che viene aggiunto allo scopo di migliorare la ricezione qualora il rapporto segnale/rumore C/N al ricevitore sia basso. Si noti che l'utilizzo di MPE-FEC è opzionale, cioè, la mancata implementazione della sua specifica nei terminali non pregiudica la possibilità di ricevere i dati correttamente (i pacchetti dati sono separati dai pacchetti di ridondanza con il FEC). Nelle situazioni in cui ci sia un'elevata perdita di pacchetti, possono essere introdotti pacchetti di ridondanza che permettono attraverso un algoritmo di interleaving e di protezione basato sul codice Reed Solomon (255, 191, 64): 255 sono i byte totali, di cui 191 sono i dati relativi all'informazione utile e 64 i byte di parità per la protezione dagli errori. DVB-H prevede diversi livelli di protezione: quanto più essi sono efficaci in termini di protezione ai disturbi tanto più basso è il bit rate utile e di conseguenza il numero di programmi trasmissibili. Come si vede, per creare i byte di ridondanza Reed Solomon, i pacchetti di dati vengono disposti lungo le colonne della tabella, uno di seguito all'altro. Se tutte le colonne di dati e tutte le colonne di FEC vengono riempite, si ottiene una ridondanza del 25% circa (con un *code rate* di $\frac{3}{4}$). Se al posto delle ultime colonne di dati vengono inseriti dei byte fittizi (*padding*) si ottiene praticamente un aumento della ridondanza (in quanto il *padding* non viene trasmesso e il codice di correzione lavora quindi su un numero minore di dati). È utile notare che la tabella descritta ha un numero massimo di 1024 righe, il che limita la grandezza massima della tabella di MPE-FEC a 2 Mbit circa. Un controllo di parità aggiuntivo CRC-32 permette di rilevare se i dati ricevuti sono affetti o meno da errori residui.

6.2 APPROCCIO "UPPER LAYER FEC"

La tecnica alternativa analizzata in questa sezione consiste nell'introduzione di un Time Interleaver e relativo *Upper Layer FEC*.

L'aspetto fondamentale delle microinterruzioni è che il *duty cycle* risulta particolarmente basso (2 ms di interruzione, e quindi di bit errati, a fronte di 600 ms di segnale corretto, ovvero circa lo 0,3%). Nell'ipotesi di prima approssimazione in cui il ricevitore dia origine ad un *burst* di errori in uscita di durata paragonabile, il tasso di errore medio risulta essere a questo livello dell'ordine di 10^{-3} , che un decodificatore FEC può facilmente recuperare. Poiché tali decodificatori funzionano bene se gli errori presenti nel flusso dati al loro ingresso non sono a *burst*, ma risultano distribuiti nel tempo, è necessario inserire anche un *Time Interleaving*.

Per minimizzare i costi:

- è desiderabile utilizzare la trasmissione via satellite utilizzando (quindi pagando) solo una parte della capacità del transponder;
- è indispensabile riutilizzare tecnologie già disponibili, quindi l'analisi è orientata agli standard che già mettono a disposizione le caratteristiche sopra citate, riducendo così i tempi entro cui gli apparati sono disponibili;
- utilizzare dei bit rate moderati (ad esempio 500 kbit/s per programma, sufficiente per ottenere una buona qualità video su schermi di 10"-15", utilizzando una codifica AVC)

Il primo punto suggerisce di utilizzare la modulazione DVB-S.

Per quanto riguarda il secondo punto di tutti gli standard della famiglia DVB l'unico che prevede un *Upper Layer FEC* separabile dal modulatore è il DVB-H [6-8]. Tale standard prevede un incapsulatore IP su TS che introduce un *FEC/Interleaver* chiamato MPE-FEC che permette di fornire maggiore protezione in caso di trasmissione difficoltosa (figura 7).

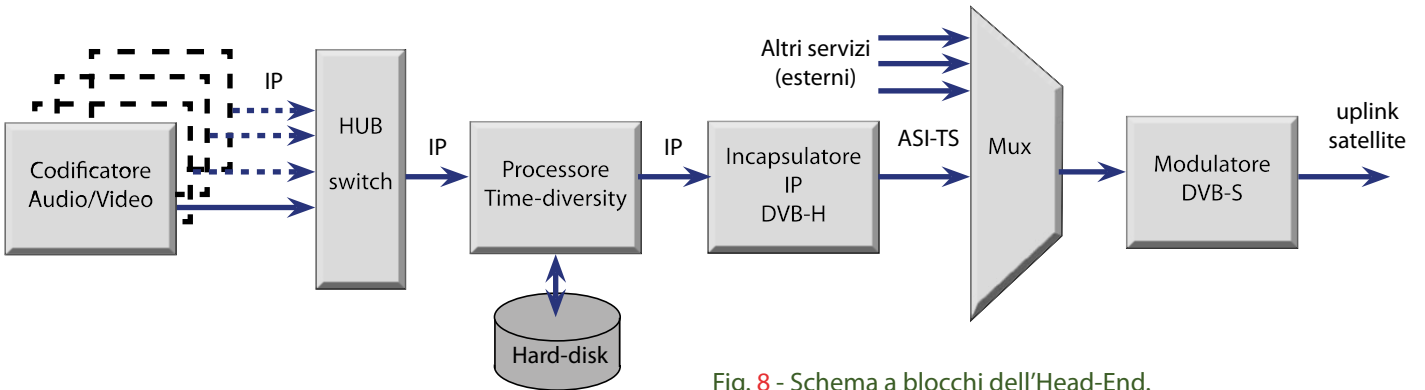


Fig. 8 - Schema a blocchi dell'Head-End.

6.2.1 ASPETTI REALIZZATIVI E CRITICITÀ

HEAD-END

Lo schema a blocchi di riferimento è quello di figura 8.

Ciascun programma necessita di un encoder A/V. Essendo quella analizzata una soluzione svincolata da piattaforme precedentemente esistenti è ipotizzabile utilizzare codifiche avanzate (ad esempio AVC) per ottenere un'efficienza maggiore e riuscire così a "comprimere" i programmi previsti in un bit rate minore risparmiando così sul costo del satellite.

Ciascun encoder, visti i bassi bit rate ipotizzati per questa soluzione, può essere un server con un ap-

posito software di codifica: il costo è quindi inferiore ad un encoder hardware.

Il *Time Division Processor* è una macchina basata su software che permette di produrre per ogni programma in ingresso la sua copia ritardata.

Il *DVB-H IP Encapsulator* è una macchina commercialmente reperibile che inserisce a livello di ogni singolo programma l'Upper Layer FEC secondo lo standard DVB-H. L'uscita è un ASI-TS che può essere multiplexata con altri servizi esterni in modo da ridurre le spese del satellite.

L'uscita del multiplexer va al modulatore DVB-S per generare il segnale per l'up link.

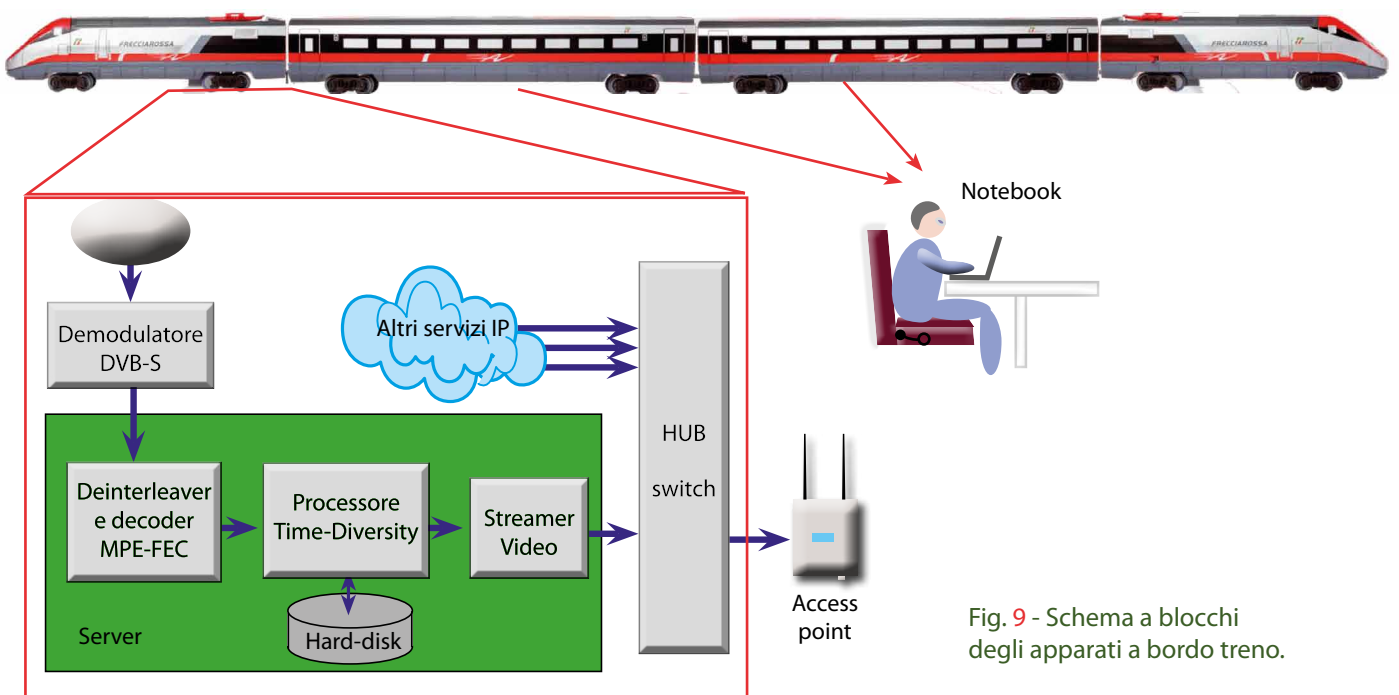


Fig. 9 - Schema a blocchi degli apparati a bordo treno.

DOWNLINK SATELLITE

Valgono le considerazioni riportate nella sezione 4.3.1. Per quanto riguarda il **Blocking e Shadowing** dovuto a ostacoli, l'Upper Layer FEC permette di andare ben oltre il valore di 20 μ s per la massima durata dell'interruzione valutato nell'ambito delle prove riportate in Appendice A.

DISTRIBUZIONE A BORDO DEL TRENO

Per ridurre i costi, una alternativa alla distribuzione DVB-T precedentemente analizzata, si può ipotizzare che gli utenti siano dotati di terminale con connessione WiFi (notebook, netbook, tablet) e quindi prevedere di utilizzare la distribuzione WiFi, già prevista sui treni di prossima realizzazione.

Lo schema a blocchi degli apparati a bordo treno è quello indicato in figura 9.

Il segnale da satellite è ricevuto mediante antenna motorizzata dotata di puntamento e tracking automatico. Il TS deve essere opportunamente processato mediante un apparato basato su computer che dovrà occuparsi di:

- operare il deinterleaver ed MPE-FEC;
- ricostruire le parti di segnali corrotte mediante il meccanismo della doppia trasmissione;
- rendere disponibili i programmi così ottenuti, in streaming.

Il flusso IP può essere mandato all'Access Point già presente sul treno insieme all'altro traffico IP per la trasmissione WiFi nelle carrozze.

PROVE DI LABORATORIO

Sono riportate in appendice B.

6.3 ALTERNATIVA MINIMALISTA

Un approccio di ripiego è quello di fornire all'utente un numero ridottissimo di programmi *live* e integrare l'offerta con materiale registrato su un video server posizionato a bordo del treno.

Tuttavia l'obiettivo inderogabile di offrire programmi *live* preclude questa possibilità.

7. CONCLUSIONI

Lo studio ha analizzato diversi approcci per consentire la distribuzione dei programmi di TV digitale a bordo dei treni ad alta velocità.

Utilizzando per la distribuzione via satellite lo standard DVB-S si è visto che la durata massima delle microinterruzioni non deve eccedere i 20 μ s; la durata stimata delle microinterruzioni dovute ai tralicci è di 2 ms (100 volte superiore rispetto a quanto ottenibile con il DVB-S). Utilizzando lo standard DVB-S2 si ottengono dei risultati migliori ma non ancora sufficienti per garantire una buona copertura con ricezione a singola antenna.

I primi due approcci descritti (sezioni 4 e 5) sono basati sulla ricezione satellitare e richiedono l'adozione dell'antenna diversity (due antenne riceventi), la rimodulazione e la trasmissione DVB-T attraverso cavo fessurato lungo le gallerie. Sono quindi caratterizzati da elevati costi di investimento.

Benché questo sia un documento tecnico, alcune scelte, per quanto tecnologicamente interessanti e con buone probabilità di successo, potrebbero compromettere la fattibilità del progetto a causa dei costi e della loro distribuzione nel tempo. Nello specifico per avere il servizio su una tratta (ad esempio Roma-Milano-Torino) è indispensabile coprire tutte le gallerie e questo richiede un investimento immediato.

L'allestimento dei treni per quanto possa essere in parte diluito nel tempo è anche suscettibile di semplificazioni e conseguenti riduzione di costi.

Per ridurre i costi, pur risolvendo il problema delle microinterruzioni, si è analizzata un'alternativa che consiste l'introduzione di un **Time Interleaver** e relativo **Upper Layer FEC** (sezione 6.2).

Questa alternativa può essere vantaggiosa dal punto di vista economico ed è stato quindi approfondito tramite alcuni test di laboratorio al fine di analizzare alcuni aspetti relativi all'efficacia del sistema in presenza di microinterruzioni.

In figura 10 sono schematizzati i principali vantaggi e svantaggi degli approcci considerati e di seguito

la Televisione ad Alta Velocità

APPROCCIO "BOUQUET ESISTENTE"

- ☺ Riutilizzo dei Transponder TiVuSat
- ☺ Copertura a cielo aperto mediante antenna con tracking automatico
- ☺ Distribuzione in galleria mediante DVB-T: il segnale viene prelevato ad esterno galleria, modulato e diffuso su cavo fessurato
- ☹ Antenna: la soluzione a tracking automatico esiste in commercio ma è costosa
- ☹ Effetto Doppler, relativo al solo segnale diretto, per il movimento reciproco tra satellite e treno.
- ☹ *Blocking e Shadowing* dovuto a ostacoli: le prove di laboratorio dimostrano che ostacoli piccoli ma periodici possono causare problemi

APPROCCIO "TIME DIVERSITY"

- ☺ Vengono trasmessi due flussi gemelli sfalsati di un certo tempo, es. 10 minuti. A bordo del treno il segnale fornito all'utente è quello ritardato. In caso di interruzioni nel buffer di ricezione è comunque presente la replica sfalsata del segnale che permette di ovviare alla mancanza di dati.
- ☺ Non è necessario l'allestimento delle gallerie
- ☹ Interruzioni maggiori del tempo di ritardo non vengono recuperate.
- ☹ "Effetto memoria": degrada gravemente il servizio

APPROCCIO "UPPER LAYER FEC + TIME-DIVERSITY"



- ☺ Vengono trasmessi due flussi gemelli sfalsati di un certo tempo, es. 10 minuti.
- ☺ In caso di interruzioni nel buffer di ricezione è comunque presente la replica sfalsata del segnale che permette di ovviare alla mancanza di dati.
- ☺ Il segnale trasmesso viene protetto da un ulteriore layer superiore con FEC e time interleaving: in ricezione quindi le microinterruzioni da catenaria e ponti vengono sanate prima del diversity switch. Quest'ultimo si trova ad operare senza "effetto memoria".
- ☺ Non è necessario l'allestimento delle gallerie
- ☹ richiede (parte di) un transponder satellitare dedicato.

- ☹ Soluzione a singola antenna non praticabile
- ☹ Antenna diversity: costo eccessivo

sono riassunti i principali vantaggi e svantaggi di questo approccio:

VANTAGGI:

- ☺ Non è necessario l'allestimento delle gallerie. Se si utilizzassero le soluzioni alternative sarebbe invece necessario allestire anche le gallerie più corte (ad esempio quelle di lunghezza inferiore ai 100 m) per evitare evidenti problemi al segnale video.
- ☺ La sosta in stazioni intermedie di durata inferiore ai 10 minuti viene gestita come per le gallerie. E' quindi possibile un risparmio per l'adeguamento delle stazioni al servizio.
- ☺ Non è necessaria la seconda antenna satellitare (e relativo commutatore a diversity) su ogni treno; questo riduce notevolmente i costi dell'hardware e relativa installazione. Il cablaggio è anche notevolmente semplificato, specialmente rispetto alla soluzione con le due antenne installate in testa e in coda del treno.
- ☺ Non è necessaria la componentistica trasmittente DVB-T a bordo, né l'utilizzo di chiavette per la

ricezione, grazie all'approccio WiFi, che già sarà presente sui treni per l'accesso a Internet. Tra l'altro questo approccio permette una migliore e più semplice integrazione dei servizi Radio-TV in streaming all'interno di un "portalino" a cui l'utente a bordo del treno si può connettere come interfaccia verso l'esterno. Della capacità del WiFi (ad esempio 54 Mbit/s) una quota corrispondente alla banda massima di accesso internet (8 Mbit/s, come ipotesi) potrebbe essere utilizzata in esclusiva per l'accesso a Internet (prevedendo un firewall per bloccare streaming da siti esterni) rendendo disponibile la restante capacità per lo streaming di bordo (TV e contenuti video locali).

Fig. 10 - Principali vantaggi e svantaggi degli approcci considerati.

SVANTAGGI

- ⊗ E' necessario (parte di) un transponder satellitare dedicato. Il costo potrebbe essere mitigato con i seguenti espedienti:
 - utilizzando satelliti "poco pregiati", quelli che non si trovano sulle posizioni orbitali più utilizzate (13 e 19.2 Est).
 - utilizzando solo parte della capacità (parte del MUX digitale), in coesistenza con altri servizi/utenti. Ciò grazie al fatto che si usa la modulazione (DVB-S) e i parametri più diffusi per il servizio satellitare.
- ⊗ E' necessario un HeadEnd apposito. Tuttavia è ipotizzabile utilizzare codifiche avanzate (AVC) per ottenere un'efficienza maggiore e riuscire così a "comprimere" i programmi previsti in un bit rate minore risparmiando così sul costo del satellite. Ciascun encoder dunque può essere un server con un apposito software di codifica: il costo è quindi inferiore ad un encoder hardware.

Lo studio realizzato ha consentito di verificare la fattibilità tecnologica, di stimare i costi e di individuare le principali problematiche realizzative ed infrastrutturali.

I risultati dello studio hanno consentito inoltre di formulare una proposta di massima da sottoporre ai potenziali clienti sia in Italia che all'estero.

I riscontri ottenuti da parte dei potenziali clienti sono stati positivi anche se, sul mercato italiano, non è prevista un'applicazione nei prossimi due / tre anni.

BIBLIOGRAFIA

1. S. Scalise, R. Mura, M. Álvarez Díaz, G. Sciascia, FIFTH Deliverable D5, Link Design Document, I1 Project IST 2001 – 39097, (3/2003).
2. V. Mignone, A. Morello, M. Visintin, "Il sistema europeo per la Televisione Digitale Terrestre", *Elettronica e Telecomunicazioni* 1/2002.
3. ETS 300 744, "Digital broadcasting systems for television, sound and data services; framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television", 1997.
4. ETSI EN 300 421, "Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services", V1.1.2, 1997.
5. ETSI TR 102 376, "Digital Video Broadcasting (DVB): User guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2) ", V1.1.1, 2005.
6. A. Bertella, P. Casagrande, D. Milanese, M. Tabone, "Il sistema DVB-H per la TV Mobile", *Elettronica e Telecomunicazioni*, n. 3, dicembre 2005.
7. ETSI EN 302 304, "Digital Video Broadcasting (DVB); Transmission System for Handheld Terminals", V1.1.1, 2004.
8. ETSI TR 102 377, "Digital Video Broadcasting (DVB); DVB-H Implementation Guidelines", V1.2.1, 2005.
9. ETSI TR 102 831 "Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)", V0.8.7, 2008.
10. V. Mignone, A. Morello, G. Russo, P. Talone, "DVB-T2: la nuova piattaforma di diffusione della TV digitale terrestre", *Elettronica e Telecomunicazioni*, n. 3, dicembre 2008.
11. A. Bertella, V. Mignone, B. Sacco, M. Tabone, "Il digitale terrestre di seconda generazione", *Elettronica e Telecomunicazioni*, n. 2, agosto 2009.
12. "Digital Video Broadcasting (DVB), BlueBook A122: Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)", Giugno 2008.

APPENDICE A

A1. TEST PRELIMINARI DI LABORATORIO

Si è inteso approfondire alcuni aspetti relativi alla ricezione del segnale satellite/terrestre in ambiente "difficile": in particolare l'effetto delle microinterruzioni dovute ai tralicci di alimentazione sulla ricezione satellitare, e l'effetto del Doppler shift in galleria sulla ricezione DVB-T.

A 1.1 EFFETTI DELLE MICROINTERRUZIONI SULLA RICEZIONE DVB-S/DVB-S2

Nella figura A1 è rappresentata la tipica situazione a cui si deve fare fronte: le linee aeree di alimentazione del treno sono sospese a tralicci metallici di 20 cm circa di sezione. La tipica campata è di 53 m, ma in curva e nelle zone ventose può essere più corta.

Alla velocità di 300 km/h i tralicci provocano uno *shadowing/blocking* di durata dell'ordine di 2 ms.

Il periodo di ripetizione dell'evento è di circa 0,6 secondi. Chiaramente a velocità più basse la durata del *blocking* aumenterà di conseguenza, seppure con periodicità più rarefatta.

In figura A2 è riportata l'attenuazione risultante da transito sotto il tralicetto, come riportato nei documenti del progetto FIFTH. Come si può notare l'attenuazione sale a 15÷20 dB. Considerato che a cielo chiaro il margine di ricezione dovrebbe essere di circa 7 dB (come da dati forniti dai costruttori dell'antenna), il passaggio sotto il tralicetto si traduce in una interruzione del segnale ricevuto.

Scopo dell'indagine di laboratorio è verificare se tale interruzione ha come conseguenza un effetto evidente sull'immagine, e comunque determinare quale è la durata massima della microinterruzione che non causa problemi a video.

Per testare l'effetto delle microinterruzioni sul segnale satellitare, è stato utilizzato il banco in figura A3.

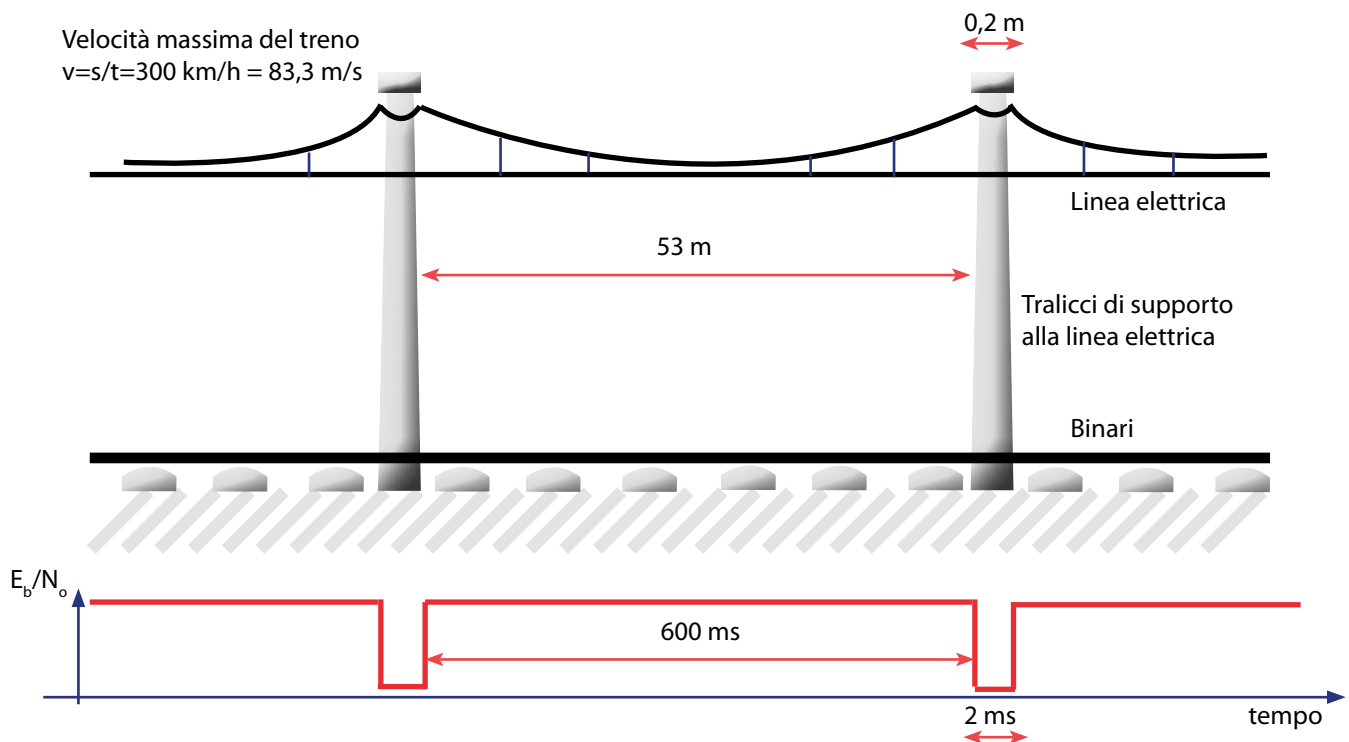


Fig. A1 - Microinterruzioni dovute ai tralicci di supporto delle linee di alimentazione.

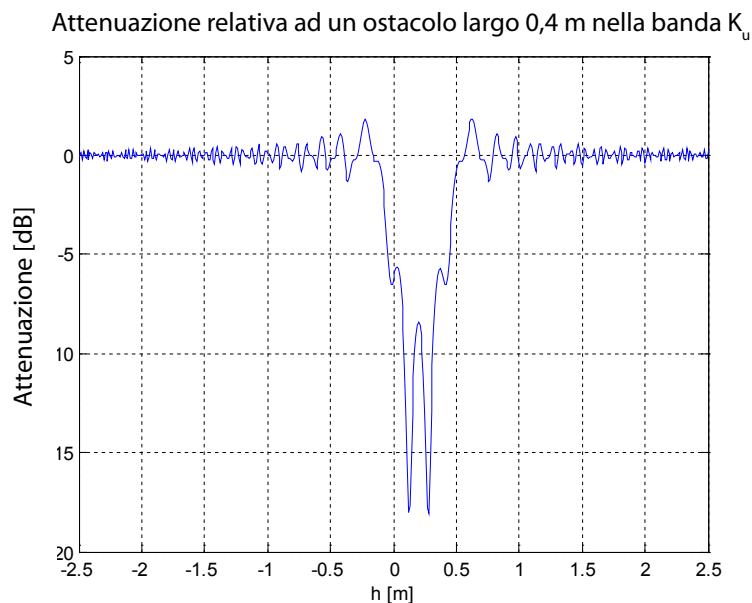


Fig. A2 - Attenuazione del segnale ricevuto da satellite durante il transito sotto i tralicci. I valori misurati sono utilizzabili anche nel caso di ostacoli quali i tralicci presi in considerazione nelle prove di laboratorio.

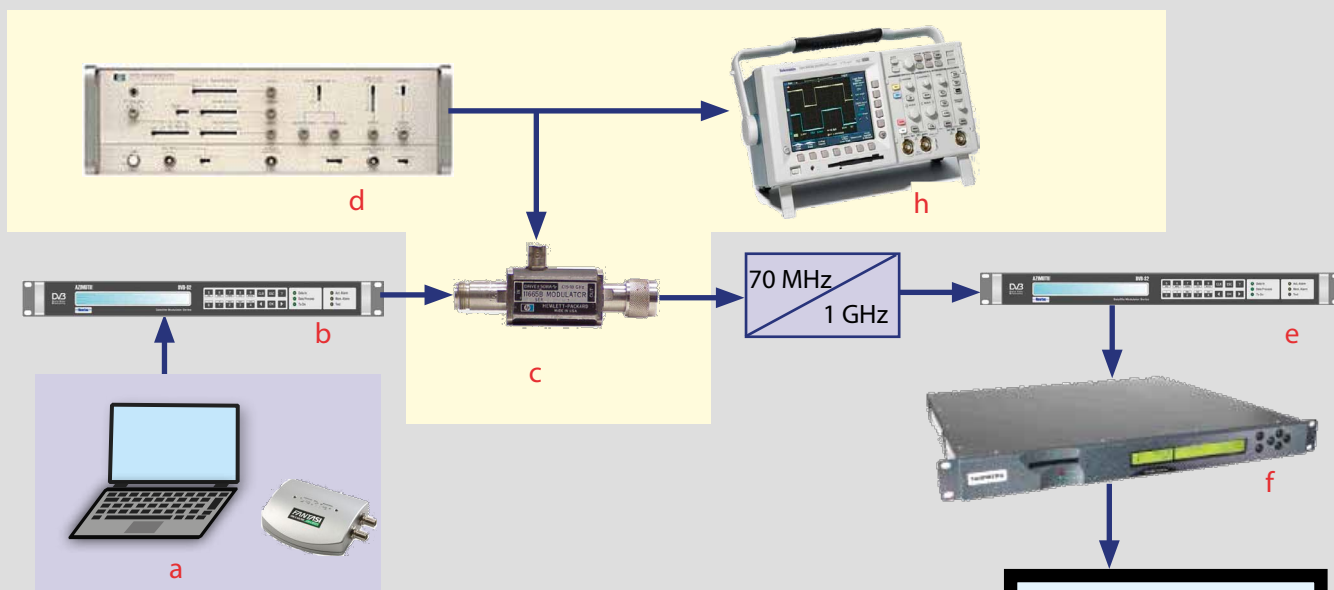


Fig. A3 - Schema di laboratorio per la verifica dell'effetto delle microinterruzioni sulla ricezione satellitare. Il *transport stream* di prova contiene un servizio A/V a 5 Mbit/s è fornito dalla sorgente ASI (a) al modulatore DVB-S (Newtec NTC2277, b). Il segnale è modulato a 70 MHz e quindi inviato al simulatore di microinterruzioni, che è costituito da un modulatore a diodi PIN (HP11665B, c), in grado di attenuare a comando elettrico il segnale RF, mandandolo sotto soglia. Il comando viene ottenuto da un generatore di impulsi (HP8007B, d). I parametri dell'impulso sono completamente controllabili da pannello frontale. Il segnale così ottenuto è convertito in frequenza a 1 GHz ed inviato al ricevitore DVB-S/DVB-S2 (Newtec NTC2280, e). Il *transport stream* è inviato ad un decoder A/V (Tandberg RX1290, f); l'immagine è visibile su un monitor (g). Un oscilloscopio digitale (h) permette di visualizzare il segnale di controllo e quindi misurare i parametri dell'impulso.

RISULTATI DELLE PROVE: DVB-S

L'utilizzo del DVB-S è previsto nel caso in cui si voglia ricevere i segnali satellitari mediante la piattaforma TivùSat. In questo caso il bit rate utile dei transponder normalmente impiegati è di 33.79 Mbit/s dal momento che vengono utilizzati i seguenti parametri di modulazione:

- Symbol Rate= 27,5 Msymb/s
- Costellazione= QPSK
- FEC=2/3

Il modulatore è stato conseguentemente impostato nel medesimo modo e si è misurata qual'è la massima durata dell'interruzione tollerabile dal sistema senza dare origine a errori visibili a video. Come risultato si ha:

$$T_{\text{interruzione}} < 20 \mu\text{s}$$

Si noti come la durata massima dell'interruzione sia 100 volte inferiore rispetto alla durata dell'interruzione dovuta ai traliccetti.

RISULTATI DELLE PROVE: DVB-S2

Nel caso in cui non si dovesse utilizzare la ricezione TivùSat, è possibile adottare modulazioni (standard o non) più efficienti: si è testato il caso DVB-S2.

Inoltre, giocando sul Symbol Rate, è possibile rendere il sistema più robusto, sacrificando la capacità.

- Symbol Rate= 5,2 Msymb/s
- ModCod= QPSK ; R=1/2
- $R_u = 5 \text{ Mb/s}$

$$T_{\text{interruzione}} < 1 \text{ ms}$$

Si può estrapolare che, con un Symbol Rate dieci volte inferiore, $R_s = 0,5 \text{ Msymb/s}$, e il medesimo ModCod, il massimo per $T_{\text{interruzione}}$ sia dieci volte superiore, quindi:

$$T_{\text{interruzione}} < 10 \text{ ms}$$

Ovviamente il bit rate utile sarà un decimo: $R_u = 0,5 \text{ Mbit/s}$.

Si è inoltre constatato che il massimo $T_{\text{interruzione}}$ non dipende dal code rate adottato.

In particolare in $R=1/2$, a $R_u=5 \text{ Mbit/s}$ il FECframe dura

$$T_{\text{FECframe}} = 64800 * T_{\text{bit}} = 64800 / (2 * 5E6) = 6,5 \text{ ms.}$$

Con $R=1/2$, il FEC dovrebbe in teoria recuperare fino a circa 50% di bit errati, quindi fino a $6,5/2 = 3,25 \text{ ms}$.

Dato che al massimo $T_{\text{interruzione}} < 1 \text{ ms}$, si conclude che il FEC non lavora nelle condizioni ottimali. Si può ipotizzare che il motivo stia nel fatto che gli errori arrivano a *burst* (salve di errori), e il guadagno del codice risulti di conseguenza "saturato" già a bassi *code rates*.

A2 EFFETTI DEL DOPPLER SHIFT NELLA RICEZIONE DVB-T DA LINEA FESSURATA

Come accennato, il segnale in galleria verrebbe diffuso utilizzando un cavo coassiale fessurato (già presente), che si comporta come sorgente distribuita di segnale RF. Per evitare perdite eccessive, il cavo è predisposto in doppi segmenti, 550+550 m, alimentati al centro. La situazione quindi è quella rappresentata in figura A4.

In basso è schematizzato il sistema di cavi, in alto il grafico che rappresenta l'andamento (normalizzato) del segnale ricevuto. Da dati preliminari comunicati a Rai Way, la fluttuazione di livello si aggirerebbe sui 7 dB. Il *Doppler shift*, come già accennato, dovrebbe essere caratterizzato da due valori, uno positivo e uno negativo, dovuti al verso discorde/concorde di propagazione dell'onda sul cavo rispetto al verso di movimento del treno.

Inoltre, in ogni singolo tratto (figura A5), il segnale ottenuto all'antenna ricevente è la sovrapposizione di infiniti contributi, ciascuno proveniente da un tratto infinitesimo di linea, e pesato in fase dal differente cammino ottico, e in ampiezza dalla differente attenuazione di tratta (distanza tra tratto di linea e antenna ricevente).

In buona sostanza, il contributo più robusto è quello più vicino, dunque perpendicolare alla linea. Un

certo intorno di tale punto fornisce ancora un contributo significativo, ma via via decrescente e poi trascurabile. Un modello raffinato prevederebbe quindi che il segnale ricevuto sia l'integrale di tutti i contributi, pesati in modulo e fase come sopra descritto. Allo scopo di semplificare i calcoli abbiamo invece considerato un modello approssimato, che riteniamo sufficientemente rappresentativo della realtà, in cui tutti i contributi sono concentrati in una sorgente di tipo puntiforme. Inoltre, si è approssimato il cammino ottico del segnale considerando il tratto AC come equivalente alla somma AB+BC. Se AB è grande (Rx lontano dal punto di alimentazione) questo è sicuramente una buona approssimazione. In caso contrario l'errore introdotto è, nel caso specifico in cui BC=2 m circa e $\lambda=1,25$ m, non eccessivo.

Il *Doppler shift* che ne risulta è dunque:

$$f_D = f_0 \cdot \frac{v \cdot \cos(\alpha)}{c} = \frac{f_0 \cdot v}{c} \cdot \cos\left(\arctg\left(\frac{d}{v \cdot t}\right)\right)$$

Dove: f_0 è la frequenza di trasmissione (220 MHz), v è la velocità del treno (300 km/h = 83 m/s), $d=BC=2$ m, c è la velocità della luce ($3 \cdot 10^8$ m/s), t è il tempo.

Questo profilo di canale è stato generato con Matlab e il file caricato sul simulatore di canale.

Per testare l'effetto del Doppler shift sulla ricezione DVB-T in galleria, è stato utilizzato il banco di misura illustrato in figura A6.

Il risultato è riportato in figura A7, in cui è visibile lo spettrogramma del segnale, ovvero il diagramma relativo all'evoluzione temporale del contenuto spettrale del segnale.

È facile notare che il segnale (portante non modulata, in questo caso), subisce una brusca variazione di frequenza, da circa +60 Hz a circa -60 Hz rispetto al valore nominale, nel momento in cui si simula il passaggio del treno a cavallo del punto di alimentazione dei due tronconi di cavo fessurato. Analogo

Fig. A4 - Andamento del segnale nel cavo coassiale fessurato in galleria.

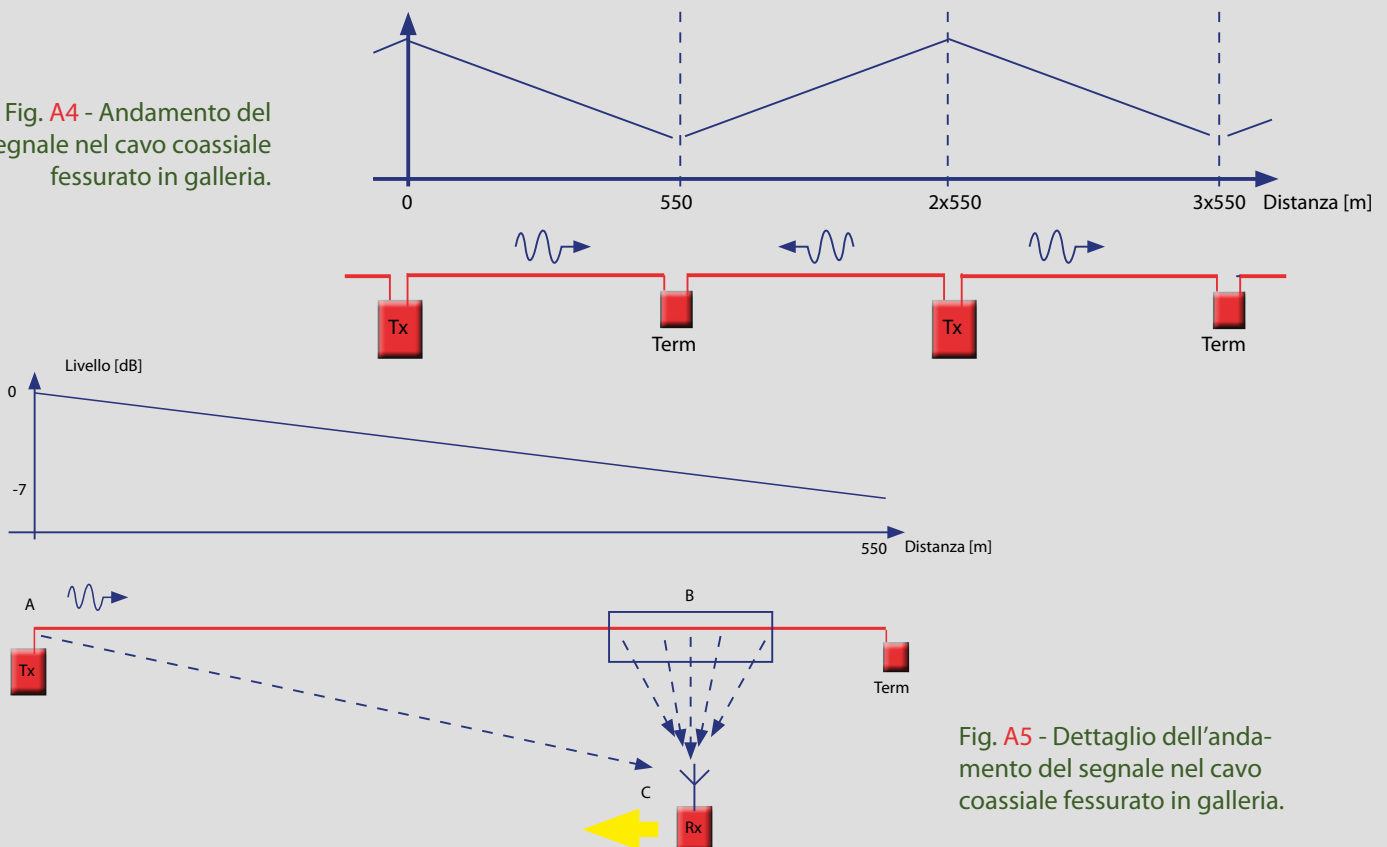


Fig. A5 - Dettaglio dell'andamento del segnale nel cavo coassiale fessurato in galleria.

comportamento (qui non visualizzato), con frequenze invertite, si ha nella transizione tra due tratti da 1100 m.

Il valore ± 60 Hz è il Doppler shift previsto, in banda III (230 MHz) a velocità di 240 km/h (massima velocità permessa al treno in galleria).

Avendo dunque validato il profilo di canale e il set-up di misura, si è proceduto alle prove vere e proprie. La modalità di esecuzione è stata la seguente:

- Impostare la modulazione desiderata, partendo da quella più robusta (QPSK, $R=1/2$, FFT=2k)
- Aggiungere rumore gaussiano bianco; decrementare il C/N fino a raggiungere la soglia di visibilità degli errori a video



Fig. A7 - Spettrogramma del segnale *clean carrier* affetto da *Doppler shift*. In ascissa è la frequenza, in ordinata il tempo (in basso il più recente), e in scala di colori il livello, funzione di tempo e frequenza.

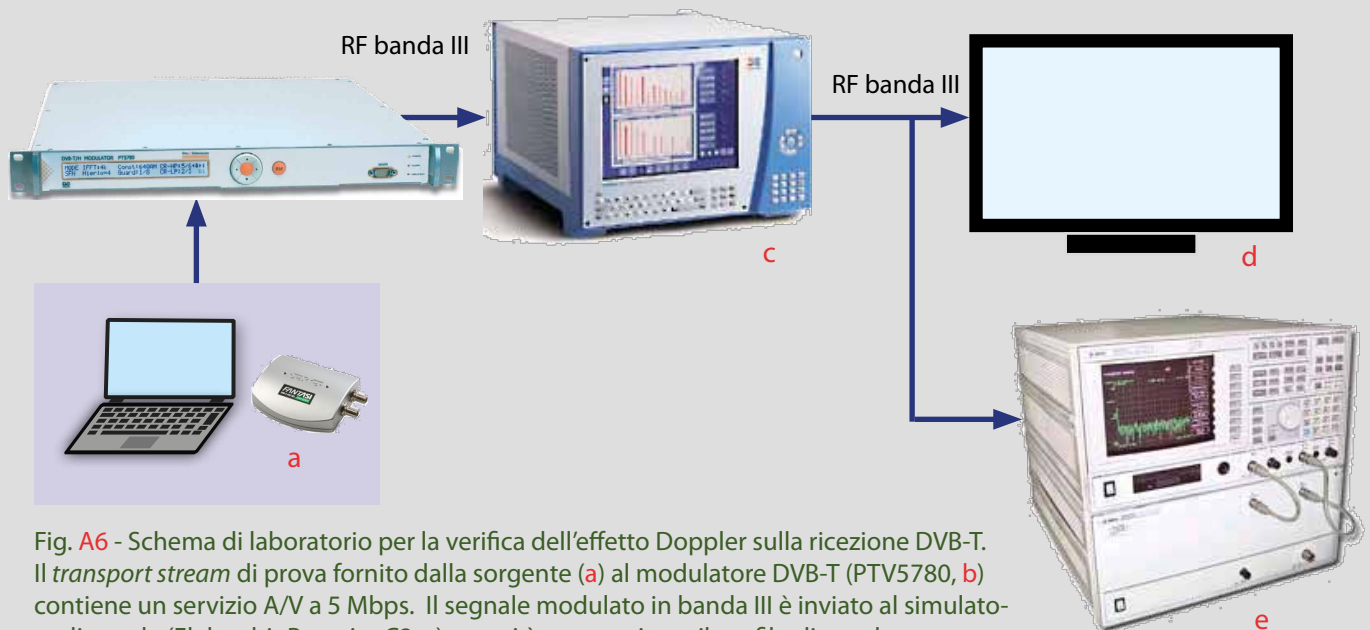


Fig. A6 - Schema di laboratorio per la verifica dell'effetto Doppler sulla ricezione DVB-T. Il *transport stream* di prova fornito dalla sorgente (a) al modulatore DVB-T (PTV5780, b) contiene un servizio A/V a 5 Mbps. Il segnale modulato in banda III è inviato al simulatore di canale (Elektrobit PropSim C2, c), su cui è stato caricato il profilo di canale ottenuto tramite simulazione Matlab. Il segnale così ottenuto, sempre in banda III, è ricevuto da un TV integrato DVB-T (d). Prima delle prove, il set-up è validato togliendo modulazione sul Modulatore DVB-T (*clean carrier mod*) e visualizzando il segnale a valle del simulatore tramite un analizzatore di spettro vettoriale (HP89441, e).

- Incrementare il C/N così trovato di un valore predefinito di margine (1 dB)
- Attivare la simulazione di canale con Doppler
- Verificare corretta ricezione, specialmente nel momento di transizione (massimo Doppler)
- Passare alla prossima modulazione (ripetere test)

RISULTATI DELLE PROVE

il sistema di trasmissione DVB-T si è dimostrato insensibile alla transizione Doppler simulata, entro il margine previsto, non solo per i modi più robusti, ma anche per i modi meno indicati per la ricezione mobile.

Il *multipath fading* non è stato simulato. Tuttavia si può ritenere che le riflessioni provenienti dalle pareti della galleria e dal treno stesso diano contributo trascurabile rispetto al segnale diretto.

APPENDICE B

B1. PROVE DI LABORATORIO SULLA CATENA DVB-H

Allo scopo di validare l'ipotesi presentata in questo articolo sono stati effettuati dei test di laboratorio utilizzando la catena DVB-H Nokia attualmente in uso presso il Centro Ricerche Rai.

Il set-up del banco di laboratorio è riportato in figura B1.

Purtroppo, a causa dell'utilizzo della catena DVB-H per altre sperimentazioni in corso presso il Centro Ricerche, non è stato possibile modificare i parametri del flusso TS generato dall'incapsulatore. Si è dovuto quindi impiegare un MPE-FEC con rate 5/6 e soprattutto non si è potuto escludere il *Time Slicing* che prevede la trasmissione a burst dei programmi allo scopo di risparmiare la batteria del terminale mobile (figura B2).

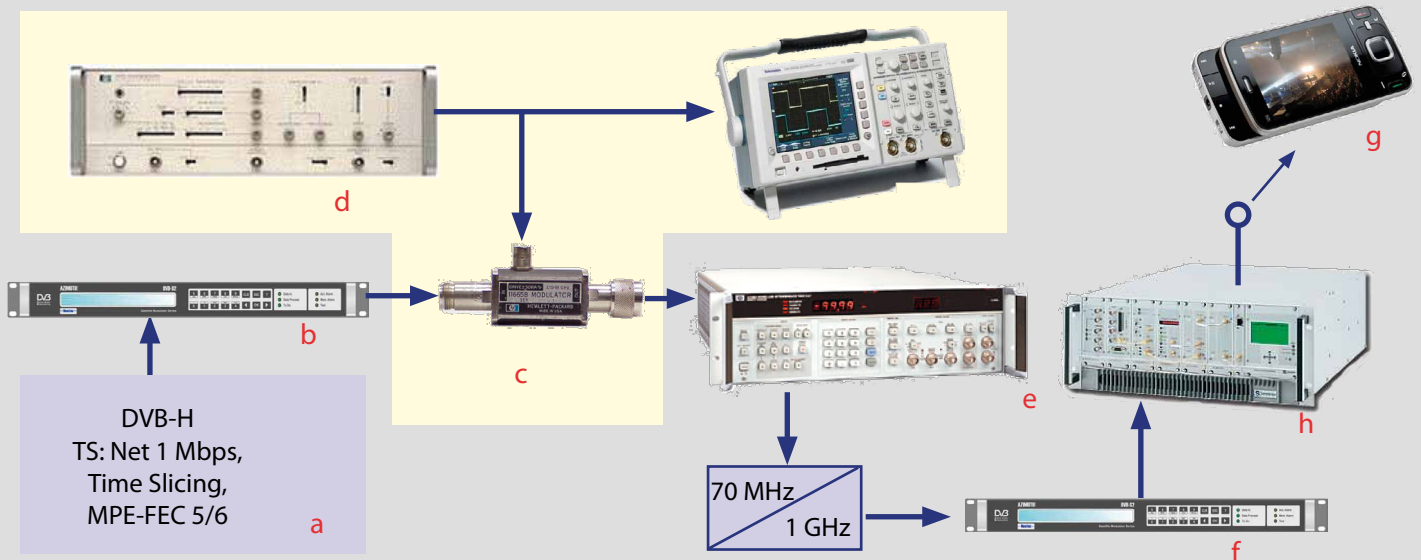


Fig. B1 - Schema a blocchi del banco di misura dei test di laboratorio. Il *transport stream* generato dalla catena DVB-H (a), che già include l'incapsulatore con Interleaver ed MPE-FEC, viene modulato mediante modulatore DVB-S (Newtec NTC2277, b) utilizzando la tipica configurazione impiegata per i servizi broadcast (QPSK, 2/3, SR= 27,5 MS/s, $R_v = 33,79$ Mbit/s). Il segnale a 70 MHz è quindi inviato al simulatore di microinterruzioni, che è costituito da un modulatore a diodi PIN (HP11665B, c), che è in grado di attenuare a comando elettrico il segnale RF, mandandolo sotto soglia. Il comando viene ottenuto da un generatore di impulsi (HP8007B, d). I parametri dell'impulso sono completamente controllabili da pannello frontale. Mediante un Noise & Interference Test Set (HP3708A, e) si somma rumore gaussiano bianco in modo da ottenere le medesime condizioni di ricezione previste a bordo treno (7 dB di margine). Il segnale così ottenuto è convertito in frequenza a 1GHz ed inviato al ricevitore DVB-S (Newtec NTC2280, f). A questo punto, allo scopo di poter visualizzare il programma mediante un ricevitore DVB-H dotato di MPE-FEC decoder (g), si è inserito un modulatore DVB-H (Screen Service, h). La tratta radio, essendo molto breve, si può assumere priva di errori.

La presenza del *Time Slicing* può essere molto deleteria in quanto il burst di errori potrebbe cadere proprio in corrispondenza dello slice del programma ricevuto rendendo il sistema molto meno protetto di quanto potrebbe essere se il bit rate fosse costante.

Le microinterruzioni generate con il banco descritto sono del tipo riportato in figura B3; i valori utilizzati durante le prove sono desunti dal progetto FIFTH.

In tabella B1 sono riportati i risultati ottenuti.

Come si può osservare, al netto di qualche sporadico errore^{Nota B1} per la situazione a 150 km/h, i risultati sono molto promettenti, tenendo conto del rate dell'MPE-FEC non certo ottimale e della presenza del *Time Slicing*.

Nota B1- La presenza di questi errori non è stata spiegata con certezza, ma con buona probabilità è dovuta alla concomitanza della periodicità delle *slices* con la periodicità delle microinterruzioni. Nella realtà, senza il *Time Slicing*, è prevedibile che questa anomalia scompaia.

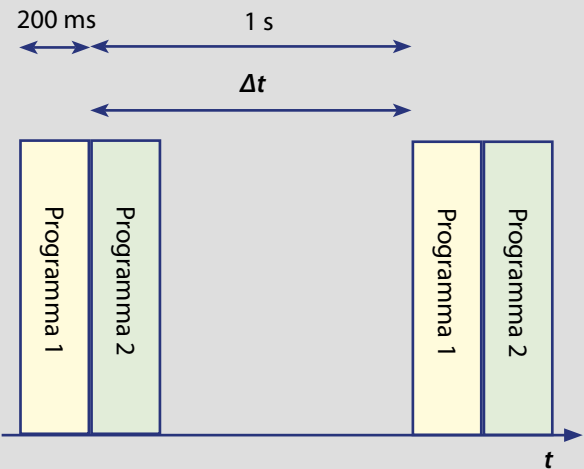


Fig. B2 - Time slicing nel DVB-H.

Non sono stati esplorati altri casi, perché la configurazione dell'MPE-FEC è del tutto sub-ottima, e si rimandano ulteriori indagini a quando si potrà riconfigurare il sistema.

Le prestazioni possono essere quindi anche di molto superiori a quanto riportato nella tabella. Se ciò fosse verificato, renderebbe possibile l'assorbimento da parte del FEC degli effetti di ostacoli di estensione maggiore.

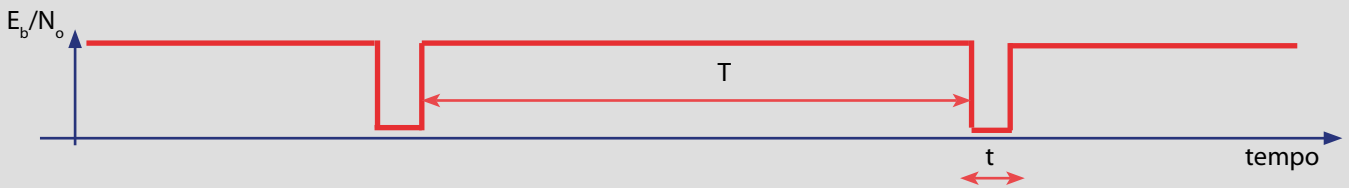


Fig. B3 - Timing delle microinterruzioni.

Velocità [km/h]	T* [ms]	t** [ms]	Risultato del test	Note
300	600	2	OK	
150	1200	4	OK	Errori occasionali
75	2400	8	OK	
37	4800	16	OK	
19	9600	32	OK	

* periodicità dei tralicci alla velocità indicata considerando una distanza tipica di 53 m

** durata delle microinterruzioni alla velocità indicata considerando uno spessore tipico dei tralicci di 20 cm

Tab. B1 - Risultati del test.