



Claudio Bonechi (clavicordo)

TLC BIGNAMI 7A PARTE

19 January 2020

Premessa

L'intento di questo EYBignami è divulgativo: vuole offrire una panoramica sulle telecomunicazioni senza entrare nei dettagli ma presentando una sintesi dei principali concetti e formule usati nella tecnica delle telecomunicazioni. I contenuti sono estratti dal libro on line “Trasmissione dei Segnali e Sistemi di Telecomunicazione” di Alessandro Falaschi, docente presso l'Università La Sapienza di Roma, che ne ha gentilmente autorizzato l'uso, disponibile integralmente per il **download gratuito** su <http://www.teoriadeisignali.it> e che potrà essere usato per gli approfondimenti. Il prof. Falaschi infatti mette a disposizione il suo libro nel preciso intento di far circolare l'informazione anziché sottrarla al pubblico mettendola in vendita.

Introduzione

Questa parte contiene accenni di tv analogica (a scopo puramente illustrativo della soluzione tecnologica) e le descrizioni degli standard di televisione digitale, quello in esercizio oggi (DVB-T) e quello (DVB-T2) che alla fine del 2022 dovrà aver sostituito l'attuale. Segue una descrizione dell'infrastruttura di rete nazionale (gestita da TIM), nella sua evoluzione dal 2014 a tempi molto recenti e cioè a metà 2018.

Televisione analogica

Una trasmissione televisiva avviene riproducendo 25 diverse immagini (dette *quadri*) al secondo. Ogni immagine è scomposta in 625 linee orizzontali, che vengono trasmesse in due fasi: prima le linee dispari, poi quelle pari. In questo modo un singolo quadro è riprodotto due volte² ogni $\frac{1}{25} = 0.04$ secondi (seppure in modo alternato) portando così a 50 semiquadri/secondo³ la frequenza di rinfresco, in modo da impedire i fenomeni di *sfarfallamento* (FLICKER) ottico⁴.

Ogni quadro è composto da 625 linee e si hanno 25 quadri al secondo ossia 15.625 righe al secondo (frequenza di riga).

20.1.2 Segnale televisivo in bianco e nero

Il segnale televisivo contiene sia le informazioni di temporizzazione necessarie a sincronizzare la scansione dell'immagine, che l'informazione di luminanza che pilota la tensione anodica, e quindi la forza con cui l'elettrone urta lo schermo.

Durante la trasmissione di ogni semiquadro, ogni riga dispone di $\frac{1}{15625} = 64 \mu\text{sec}$. Il segnale modulante è sempre positivo (vedi fig. 20.2), ed associa ai valori più piccoli la maggiore luminanza⁵, trasmettendo in logica negata, in modo che gli impulsi di sincronismo orizzontale siano di ampiezza superiore al livello del nero (il 70 % dell'ampiezza). Il tempo dedicato alla trasmissione della luminanza di una riga è di $52 \mu\text{sec}$, mentre nei restanti 12 il segnale oltrepassa il livello del nero (in modo da rendere invisibile il beam) e quindi un impulso determina il ritorno orizzontale. In figura è anche mostrato un *burst colore* che è presente nelle trasmissioni a colori per sincronizzare la *portante di colore* (vedi di seguito).

20.1.3 Formato dell'immagine

Ogni singolo quadro è realizzato con un rapporto di aspetto 4:3 (che rappresenta il rapporto tra le dimensioni orizzontale e verticale), e solo 575 delle 625 linee vengono mostrate (infatti 25 linee per ogni semiquadro cadono al di fuori dello schermo⁶).

⁵In questo modo si riduce mediamente la potenza trasmessa, dato che sono più frequenti scene chiare che scure.

⁶Nel tempo destinato alle linee che non sono mostrate, vengono comunque trasmesse altre informazioni, come ad esempio i dati che compaiono nelle pagine del televideo.

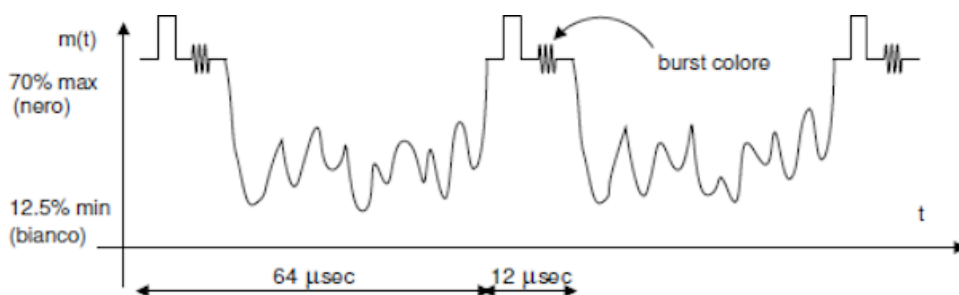


Figura 20.2: Forma d'onda del segnale televisivo

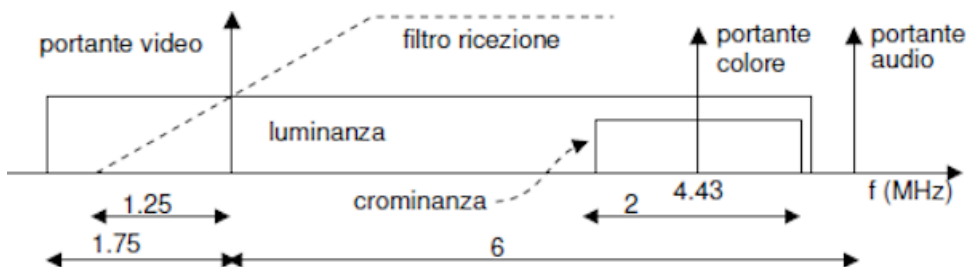


Figura 20.3: Occupazione spettrale di un segnale televisivo

20.1.6 Segnale di cromaticità

Il requisito che più di altri ha determinato quale soluzione adottare per effettuare trasmissioni a colori, è che queste dovessero essere correttamente visibili anche da parte di ricevitori in bianco e nero.

Un risultato di colorimetria è che ogni colore è scomponibile nella somma di tre colori fondamentali (verde, rosso e blu), effettivamente operata dagli apparati di acquisizione. La somma⁸ della tre componenti fornisce il segnale di luminanza L , che viene utilizzato esattamente come per il bianco e nero. Il segnale di cromaticità è invece costruito da una coppia di segnali differenza $\begin{cases} \Delta_R = R - L \\ \Delta_B = B - L \end{cases}$, che sono usati per modulare in ampiezza, portante soppressa, una portante di colore, usando Δ_R come componente in fase e Δ_B come componente in quadratura⁹. Una analisi più precisa, è fornita al § 12.2.2.

⁷Ad esempio, si può stabilire di realizzare la stessa risoluzione orizzontale e verticale. A fronte delle 625 linee, il rapporto di aspetto di $\frac{4}{3}$ determina l'esigenza di individuare $625 \cdot \frac{4}{3} = 833 \frac{\text{punti}}{\text{linea}}$, e quindi $833 \cdot 625 = 520625 \frac{\text{punti}}{\text{quadrato}}$, ossia circa $13 \cdot 10^6 \frac{\text{punti}}{\text{secondo}}$. Per il teorema del campionamento, il segnale deve avere una banda minore od uguale di $\frac{f_c}{2} = 6.5 \text{ MHz}$.

⁸In realtà ogni componente è pesata mediante un opportuno coefficiente che tiene conto della diversa sensibilità dell'occhio ai tre colori fondamentali. Infatti, per ottenere il bianco, i tre colori non devono essere mescolati in parti uguali, bensì 59% di verde, 30% di rosso e 11% di blu.

⁹Le ampiezze delle componenti in fase e quadratura del segnale di cromaticità devono essere opportunamente scalate, per impedire al segnale complessivo (luminanza più cromaticità) di assumere valori troppo elevati.

L'occupazione spettrale del segnale di cromaticità è ridotta ($\pm 1 \text{ MHz}$) rispetto a quello di luminanza, in quanto la *risoluzione spaziale* dell'occhio umano è ridotta per stimoli colorati, e quindi Δ_R e Δ_B possono variare più lentamente di L .

20.1.7 Sincronizzazione

Per impedire fenomeni di interferenza tra c.a. di b.f. nella ricezione del segnale di cromaticità, occorre effettuare una demodulazione omodina, e l'oscillatore del ricevitore si mantiene coerente con la portante di colore, grazie ai *burst di colore* presenti dopo l'impulso di sincronizzazione orizzontale, costituiti da 8 cicli di portante. Questo segnale ha inoltre lo scopo di segnalare la *presenza* della componente di cromaticità: in caso contrario infatti (trasmissione B/N) il ricevitore deve disattivare il circuito del colore, per non produrre deterioramenti dell'immagine.

20.2 FM broadcast

Illustriamo brevissimamente i parametri delle trasmissioni FM ricevibili mediante *la radio di casa*. Nella banda 88-108 MHz operano le radio FM, con spaziatura di 200 KHz l'una dall'altra.

Ad ogni emittente è concessa una deviazione massima della frequenza istantanea pari a $\Delta f = 75$ KHz, ed il trasmettitore viene tarato mediante un $m(t)$ sinusoidale a frequenza di 15 KHz, e k_f regolato in modo da ottenere $\Delta f = 75$ KHz. In queste condizioni, risulta $\beta = \frac{k_f}{w} = \frac{75}{15} = 5$, e la regola di Carson fornisce

$$B_C = 2(k_f + w) = 2(75 + 15) = 180 \text{ kHz}$$

Un esame degli andamenti riportati in Fig. 10.3 mostra che per $\beta = 5$, le $J_n(\beta) \neq 0$ sono le prime 8, e dunque la "vera" banda ha una estensione

$$B = 2 \cdot 8w = 16 \cdot 15 \cdot 10^3 = 240 \text{ kHz}$$

Qualora il segnale sinusoidale venga sostituito da un messaggio limitato in banda con $\pm W = \pm 15$ KHz, con potenza eguale a quella del seno e cioè $P_m = \frac{1}{2}$, la Δf non è più definita con esattezza, e conviene ricorrere alla definizione di

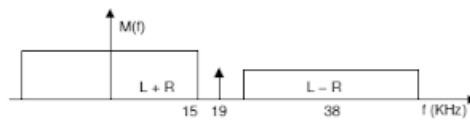
$$\beta' = \frac{\sigma_f}{W} = \frac{k_f \sqrt{P_m}}{W} = \beta \sqrt{P_m} = \beta \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707 \cdot \beta$$

a cui corrisponde una banda *efficace*

$$B = 2W(\beta' + 1) = 2 \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot (0.707 \cdot 5 + 1) = 136 \text{ kHz}$$

Nell'FM stereo, il segnale trasmesso deve essere compatibile con i ricevitori mono, ed allora il segnale modulante è un segnale multiplato FDM, e "composto" da tre "canali":

- la somma di Left + Right (L+R) come segnale di banda base, che consente la compatibilità con gli apparati "mono";
- il segnale L-R è centrato a frequenza di 38 KHz mediante modulazione AM-BLD;
- una portante posta a 19 KHz, ed a cui si concede il 10% di $\mathcal{P}_M$, mentre il restante 90% di $\mathcal{P}_M$ è condiviso tra L+R e L-R. Il tutto è poi modulato FM.



Trasmissione satellitare

Inseriamo solo un accenno alla trasmissione via satellite

20.3 Collegamenti satellitari

Tutti i satelliti artificiali hanno, ovviamente, l'esigenza di mantenere un collegamento radio con il centro di controllo orbitale terrestre; in tutti i modi, un buon numero di satelliti è stato lanciato per svolgere un ruolo nell'ambito dei sistemi di comunicazione e telerilevamento, come ad esempio nei casi dei satelliti meteorologici, di radiolocalizzazione (il GPS, ma non solo), per ponti radio televisivi, di telefonia, di broadcast televisivo. Senza molto togliere alla generalità dell'esposizione, questa procede illustrando l'ultimo caso citato, detto DVB (*Digital Video Broadcast*), in cui il satellite semplicemente ritrasmette verso una estesa area geografica i segnali ricevuti da terra, come mostrato in figura 20.4, assieme all'*ipsogramma*¹⁶ relativo.

20.3.1 Studio di produzione

Non volendo assolutamente entrare qui negli innumerevoli dettagli che andrebbero illustrati, limitiamoci a descrivere i passi necessari a generare il segnale inviato al satellite:

- si effettua la codifica digitale MPEG2 (§ 12.3.1.4) del segnale televisivo, ottenendo un flusso numerico chiamato PS (*Program Stream*);
- più PS sono pacchettizzati e multiplati (§ 12.3.2.1) in un nuovo flusso chiamato MPEG-TS (*Transport Stream*), assegnando loro un identificativo noto come PID (*Packet Identifier* o *Program ID*);
- alcuni PID sono riservati per indicare l'inserimento all'interno del TS di informazioni di controllo (*o tabelle*) note come PAT (*Program Association Table*), PMT (*Program Map Table*), CAT (*Conditional Access Table*), NIT (*Network Information Table*), etc;
- il TS è sottoposto ad un processo di *scrambling* basato su di un generatore binario pseudocasuale, in modo da renderne la densità spettrale più uniforme possibile;
- il risultato è sottoposto ad una codifica di canale FEC (vedi pag. 167) a tre stadi, in cui è prima applicato un codice di *Reed-Solomon* (§ 11.3.1.2), poi un *interleaver*, (§ 8.4.2.3) e quindi un codificatore *convoluzionale* (§ 11.3.2), rendendo il segnale particolarmente robusto nei confronti degli errori di trasmissione sia singoli che a burst;
- il nuovo flusso numerico è modulato QPSK (a due bit per simbolo) con codifica di Gray, sagomando i simboli con un filtro a coseno rialzato con $\gamma = 0.35$ ripartito tra trasmettitore e ricevitore finale, ossia adottando un formatore di impulsi a *radice di coseno rialzato* (vedi § 8.2.2.3).

20.3.2 Uplink

Il collegamento in salita (UPLINK) è quello mediante il quale lo studio di produzione invia al satellite l'MPEG-TS che deve essere re-distribuito. Il segnale sopra descritto è quindi amplificato a potenza W_{dT} , parte della quale si perde nel cavo che collega l'antenna trasmittente di guadagno G_T^e . L'EIRP^e (Equivalent Isotropically Radiated Power) rappresenta la potenza effettivamente irradiata¹⁷, che si riduce notevolmente nella trasmissione da terra a satellite. Considerando

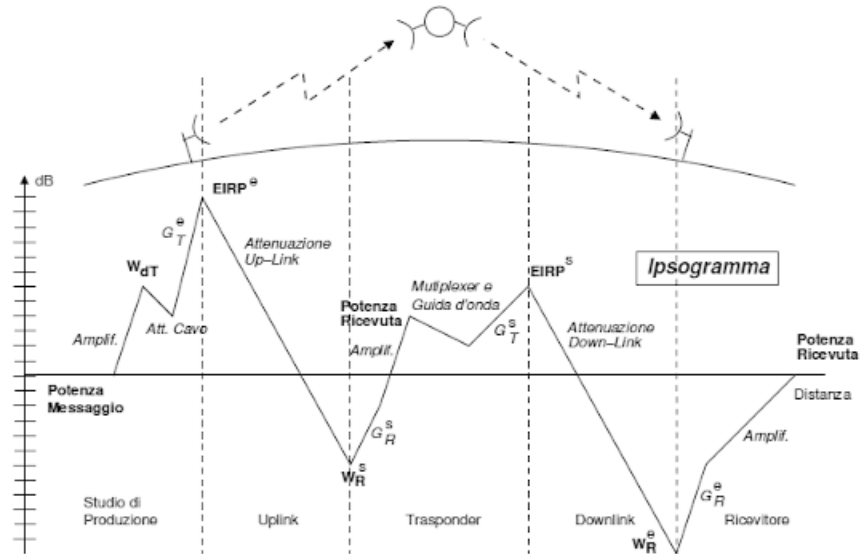


Figura 20.4: Andamento del livello di potenza in dB per un collegamento satellitare

una portante di 2 GHz e la quota di un satellite in orbita geostazionaria¹⁸ (36.000 Km da terra), l'attenuazione di spazio libero dell'UP-LINK (eguale a quella del DOWN-LINK da satellite a terra) è di circa 190 dB.

Downlink

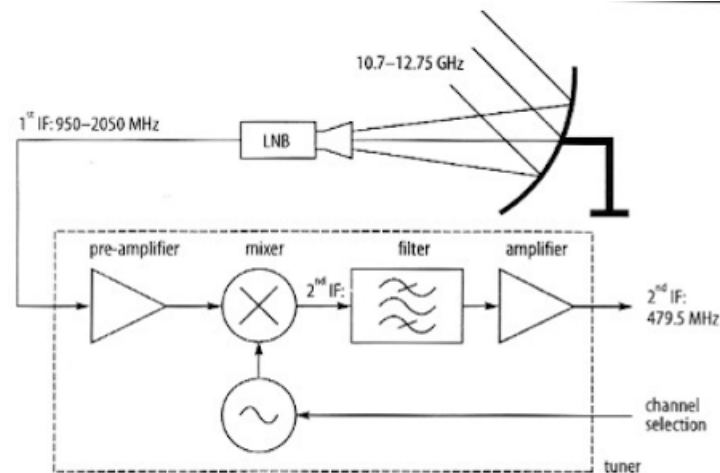


Figura 20.6: Ricevitore satellitare DVB

Dal lato del ricevitore terrestre arriva dunque un segnale di potenza W_R^e , che ha subito l'attenuazione del down-link; questo è quindi riportato ad un livello di potenza appropriato, sia grazie al guadagno di antenna, che per mezzo di uno stadio di amplificazione.

Con questo si concludono i riferimenti al libro di Alessandro Falaschi, citato nella premessa, che ringraziamo per la sua disponibilità a condividere con tutti e gratuitamente i frutti del suo eccellente lavoro.

Televisione digitale

Il Sistema DVB-T

DVB = Digital Video Broadcasting

DVB-S = DVB Satellitare

DVB-C = DVB via Cavo

DVB-T = DVB Terrestre

Seguono brevi estratti dell'articolo **“Lo standard DVB-T per latelevisione digitale terrestre”** pubblicato sulla rivista Rai: “Elettronica e Telecomunicazioni, 1 aprile 2002”, www.crit.rai.it

Autori: Vittoria Mignone, Alberto Morello, Michele Visintin, Rai Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica Torino

Sommario In ambito al Progetto DVB (Digital Video Broadcasting) e ai progetti europei RACE dTTb, ACTS VALIDATE e MOTIVATE, il Centro Ricerche ed Innovazione Tecnologica della Rai (CRIT) ha direttamente contribuito alla definizione e alla validazione del sistema per la diffusione televisiva digitale terrestre (DVB-T). Il sistema, che permette la ricezione fissa, portatile e mobile, è basato sulla modulazione multiportante COFDM, una soluzione tecnica avanzata che consente di configurare i parametri di trasmissione in modo flessibile per meglio adattarsi alle caratteristiche del canale di diffusione terrestre. Sono possibili due modalità operative: con 2K (ossia duemila) portanti per le reti di diffusione convenzionali multifrequenza (MFN), e con 8K portanti per operare anche su reti a singola frequenza (SFN). L'introduzione di reti SFN, non possibile nelle trasmissioni televisive analogiche, consente una utilizzazione ottimale dello spettro.

Tra i **requisiti** del sistema troviamo:

- la necessità di mantenere la maggior comunanza possibile con i sistemi DVB-S e DVB-C, al fine di consentire la produzione di ricevitori commerciali multi-standard a basso costo;
- la possibilità di ricezione fissa con terminali portatili, dotati di antenna omnidirezionale, in aggiunta alla ricezione con antenna direttiva posta sul tetto degli edifici;
- la possibilità di introdurre reti SFN a larga copertura (regionale e nazionale) impiegando trasmettitori sincronizzati operanti sullo stesso canale a radiofrequenza (RF), al fine di sfruttare i significativi vantaggi in termini di efficienza spettrale rispetto alle reti convenzionali multifrequenza (MFN).

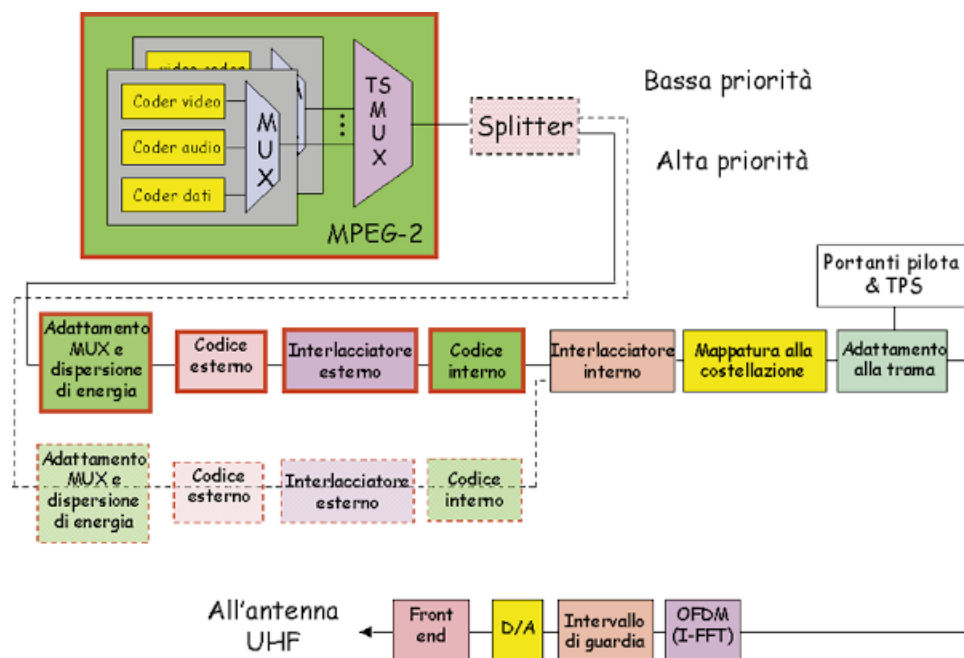


Figura 1

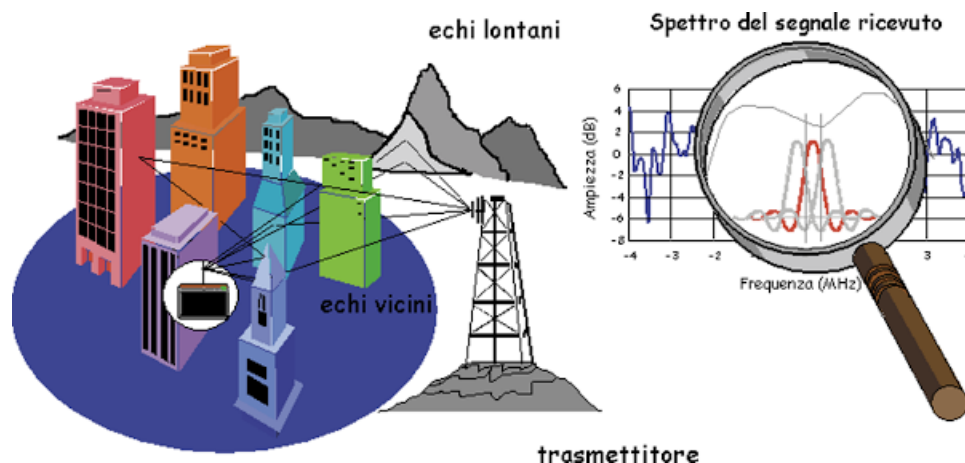
Il sistema DVB-T, la cui architettura generale è mostrata in figura 1, è basato sull'adozione degli standard MPEG-2 per la Codifica del segnale audio/video di sorgente e per la Multiplazione: è stato sviluppato per la trasmissione di segnali televisivi multi-programma a definizione convenzionale nel formato MPEG-2 MP@ML, ma è aperto all'evoluzione verso l'alta definizione (HDTV) mediante l'uso di livelli e profili MPEG-2 più elevati.

Gli elementi indicati con un bordo rosso nel diagramma a blocchi di figura 1 sono comuni al sistema DVB-S. Essi includono: la struttura di trama (derivata dal Multiplicatore di Trasporto MPEG-2), la dispersione dell'energia del segnale per uniformare la distribuzione spettrale all'interno del canale RF, una sofisticata tecnica di protezione dagli errori tramite concatenazione di un codice esterno con un codice interno a tasso di codifica variabile mediante processo di interlacciamento. Il codice esterno è il Reed-Solomon RS(204,188, t=8) accorciato, derivato dall'originale codice sistematico RS(255,239, t=8). I codici interni sono convoluzionali punturati, basati su un codice convoluzionale madre a tasso 1/2 con 64 stati. Oltre al codice madre, il sistema permette i tassi punturati di 2/3, 3/4, 5/6 and 7/8. L'interlacciamento è basato sul processo di interlacciamento convoluzionale di Forney ed ha profondità pari a 12.

Modulazione e Codifica di Canale

Il cuore del sistema DVB-T risiede nell' "Adattatore di canale" che è stato progettato specificatamente per fornire la massima comunanza con i sistemi via satellite e cavo e garantire le migliori prestazioni nella diffusione del segnale sui canali televisivi terrestri. Esso include la modulazione digitale e la codifica di canale per la correzione degli errori di trasmissione.

Il tipo di modulazione digitale adottato dal DVB differisce sensibilmente per i sistemi via satellite, via cavo e sui canali terrestri, in quanto deve adattarsi strettamente alle diverse caratteristiche della propagazione e del canale RF. Il canale via satellite è fondamentalmente non lineare, a larga banda e limitato in potenza: pertanto la modulazione QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) a singola portante adottata nel sistema DVB-S risulta idonea allo scopo. Le reti via cavo sono caratterizzate invece da distorsioni lineari causate dal disadattamento della rete e, sebbene non limitate in potenza, sono soggette a limitazioni di banda; sulla base di questi vincoli, il sistema DVB-C usa modulazioni M-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) a singola portante e ad elevata efficienza spettrale, e non include l'interlacciamento e il codice interno; è tuttavia previsto l'impiego nel ricevitore di un equalizzatore adattativo degli echi che possono essere presenti nella rete in cavo.

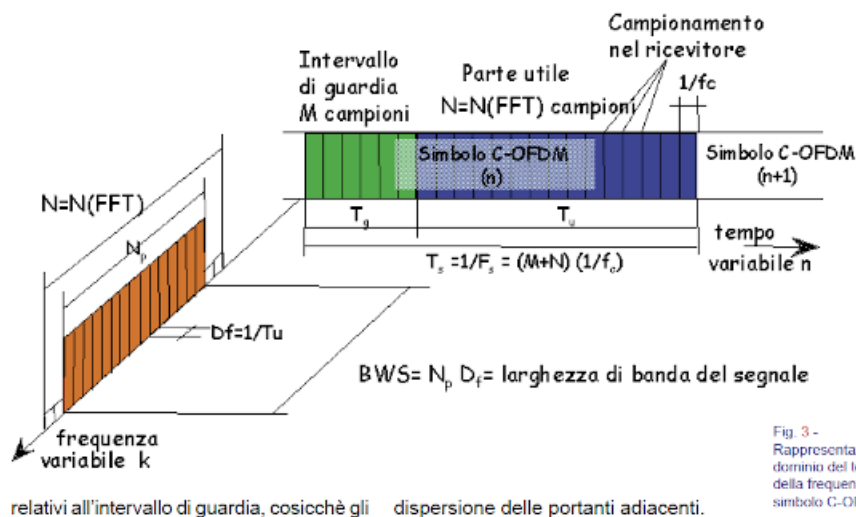
**Figura 2**

Il canale terrestre è caratterizzato da propagazione multi-cammino, dovuta alle riflessioni, che può degradare pesantemente il segnale trasmesso (figura 2). Gli echi naturali dell'ordine di alcuni microsecondi e legati all'orografia del terreno, così come gli echi artificiali dell'ordine di centinaia di microsecondi dovuti ai segnali provenienti dai vari trasmettitori isofrequenziali presenti nelle reti SFN, non possono essere trattati con tecniche di modulazione a portante singola, anche perché richiederebbero l'impiego di equalizzatori molto lunghi e complessi. Pertanto, sulla base di tali considerazioni e dei risultati di accurate valutazioni tecniche comparative, è stata scelta la modulazione multiportante COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing), già adottata con successo nel DAB (Digital Audio Broadcasting), il sistema proposto per la diffusione radiofonica digitale.

Il principio su cui si basa questa tecnica di modulazione consiste nel distribuire il flusso dati totale tra moltissime portanti (a banda stretta e quindi a bassa velocità di trasmissione) equispaziate in frequenza, all'interno della banda del canale di diffusione (figura 3). A ciascuna delle portanti è applicata la modulazione digitale QPSK, M-QAM, ecc...; la mutua ortogonalità è garantita per una spaziatura in frequenza tra le portanti pari alla velocità di simbolo, $1/T_u$. Il processo OFDM è attuato per mezzo di una I-FFT (Inverse Fast Fourier Transform)."

Per la descrizione delle altre funzioni del sistema si rimanda all'articolo citato.

Il sistema DVB-T è caratterizzato da due modalità operative, la prima con FFT su 2k portanti per reti convenzionali multi-frequenza (MFN), la seconda con FFT su 8k portanti per coprire anche reti a frequenza singola (SFN).



Il sistema COFDM è inerentemente robusto contro il fading selettivo in frequenza presente sul canale terrestre, affetto da propagazione multi-cammino, in quanto le portanti a banda stretta occupano una piccola porzione dello spettro, dove la risposta in frequenza del canale è “localmente piatta” e non distorta (figura 2). La resistenza dei sistemi COFDM contro gli echi è anche basata sulla presenza nel simbolo OFDM di un intervallo di guardia temporale (con durata pari a T_g) che separa simboli OFDM adiacenti (**figura 3**). L'intervallo di guardia consiste in una continuazione ciclica della parte utile T_u , del simbolo ed è inserito davanti ad essa. Dei campioni complessi che corrispondono ad un simbolo, il ricevitore scarta quelli relativi all'intervallo di guardia, cosicché gli echi che raggiungono il ricevitore con un ritardo t inferiore a T_g non generano ISI (Inter Symbol Interference).

In aggiunta all'intervallo di guardia, il sistema COFDM fa uso di un potente schema di correzione degli errori che permette il recupero dell'informazione trasportata da quelle portanti che sono state affette da fading selettivo in frequenza. A questo scopo, dopo la codifica interna (con codice convoluzionale), è presente anche un interlacciatore in frequenza che consente di ottenere la massima dispersione delle portanti corrotte nel flusso dati. L'interlacciatore interno consiste nella concatenazione di un interlacciatore di bit, per separare i bit mappati sui punti della costellazione, e di un interlacciatore di simbolo, per disperdere le portanti che trasportano i dati utili. L'interlacciatore di simbolo è stato sviluppato presso RaiCRIT, con l'obiettivo di ridurre i requisiti di memoria nel terminale d'utente e, contemporaneamente, massimizzare la dispersione delle portanti adiacenti.

La generazione degli indirizzi dell'interlacciatore di simbolo, rappresentata in figura 4, è caratterizzata da una realizzazione molto semplice che non richiede di memorizzare la regola di interlacciamento nel ricevitore e riduce i requisiti di memoria. Il nucleo è costituito dal classico generatore di sequenza binaria pseudo-casuale a massima lunghezza (PRBS). L'intera sequenza $2k$ o $8k$ è ottenuta ripetendo due volte il ciclo PRBS e aggiungendo il bit più significativo (MSB) cambiato ad ogni nuovo valore. La regola di permutazione dei fili è stata ottimizzata con

simulazioni al calcolatore per ottenere la massima dispersione delle portanti dati adiacenti. Il blocco di controllo dell'indirizzo verifica che l'indirizzo così generato sia inferiore al numero di portanti dati: se la condizione non è verificata viene generato un altro valore. Al fine di minimizzare ulteriormente l'ammontare di memoria richiesta, la regola di generazione dell'indirizzo è usata come indirizzo di "scrittura" per i simboli OFDM pari, e come indirizzo di "lettura" per quelli dispari.

Le portanti dati, che portano le informazioni utili, sono modulate in M-QAM ($M=4, 16, 64$), con mappatura di Gray. Costellazioni M-QAM non uniformi sono anche previste nel caso di trasmissione gerarchica.

Tabella 1. Parametri del sistema DVB-T (canalizzazione a 8MHz)

Parametro	Modalità 8K				Modalità 2K			
Portanti attive	6817				1705			
Portanti dati	6048				1512			
Durata utile del simbolo T_u	896 μ s				224 μ s			
Spaziatura fra le portanti $1/T_u$	1116 Hz				4464 Hz			
Larghezza di banda	7,61 MHz							
$\Delta=T_g/T_u$	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Intervallo di guardia T_g	224 μ s	112 μ s	56 μ s	28 μ s	56 μ s	28 μ s	14 μ s	7 μ s

I parametri principali del sistema DVB-T sono riportati in Tabella 1. Il sistema è ottimizzato per canali a 8 MHz (spaziatura di canale in UHF), ma può essere adattato anche su canali da 7 MHz (utilizzati in molti paesi, tra i quali l'Italia) e da 6 MHz (spaziatura adottata in USA e Giappone), modificando opportunamente la frequenza di campionamento nel ricevitore. Le tre possibili spaziature di canale in frequenza sono state introdotte nella specifica al fine di permettere la più vasta adozione del sistema DVB-T.

Rimando all'articolo citato per le restanti informazioni sul sistema.

Il Sistema DVB-T2

Il DVB-T2 è lo standard che verrà adottato entro il 2022 subentrando allo standard attuale, il DVB-T, come ben sappiamo. Quello che segue è tratto dall'articolo "DVB-T2 la nuova piattaforma di diffusione della TV digitale terrestre" pubblicato su "Elettronica e Telecomunicazioni N° 3 Dicembre 2008" e disponibile on line su www.crit.rai.it

Autori: Vittoria Mignone e Alberto Morello, Rai. Giuseppe Russo e Paolo Talone, Fondazione Ugo Bordoni, Roma.

Sommario

E' nato il DVB-T2, la nuova piattaforma di televisione digitale per diffusione terrestre verso terminali fissi o portatili, venuto alla luce a poco più di un decennio di distanza dallo standard attualmente in esercizio (DVB-T). Ha prestazioni vicine all'ottimo teorico, e offre tangibili vantaggi in termini di incremento di capacità trasmissiva a parità di banda occupata, oppure di copertura radio a parità di potenza emessa rispetto al DVB-T. L'incremento di capacità trasmissiva si può quantizzare in quasi il 50%; con le nuove codifiche di sorgente (MPEG-4 AVC) questo vantaggio diventa schiacciante: circa il 300% se si ragiona in termini di numero di programmi trasportabili pari qualità. In realtà la coppia DVB-T2 / MPEG-4 non è solo la tecnologia per triplicare i programmi trasportati da un multiplex DTT a parità di banda occupata, ma soprattutto è il driver ideale per l'introduzione della televisione ad alta definizione, che può sostituire quella tradizionale senza quasi provocare decremento del numero programmi attualmente diffusi. Il passaggio al DVB-T2 non implica modifiche rilevanti nei siti trasmettenti e nelle antenne riceventi a casa dell'utente, ma richiede la sostituzione dei ricevitori che, con l'occasione, potrebbero adeguarsi alla ricezione della TV ad alta definizione, comunque non possibile con i decoder attuali a standard DVB-T. Questo articolo fornisce una descrizione delle tecnologie utilizzate dal sistema DVB-T2 e presenta alcuni risultati simulativi che dimostrano come il sistema definito soddisfi ed in qualche caso superi significativamente i requisiti commerciali alla base del processo di standardizzazione.

"Diversi paesi hanno dimostrato, nel recente passato, interesse allo sviluppo di nuovi standard di diffusione per la televisione digitale in grado di assicurare prestazioni superiori rispetto ai sistemi in uso ed ormai consolidati da anni. In particolare, il riferimento è agli standard sviluppati negli anni '90 dal consorzio DVB, vanto della tecnologia europea e attualmente più adottati nel mondo: rispettivamente il DVB-S per la diffusione satellitare e il DVB-T per quella terrestre, oggi identificati come sistemi DVB di prima generazione."

"Le nuove tecnologie, pur restando nel solco delle precedenti, ne ottimizzano a fondo le potenzialità. In particolare (sia nel terrestre che nel satellitare) è stato possibile introdurre algoritmi di correzione d'errore particolarmente avanzati, con prestazioni tali da rendere possibile l'impiego di modulazioni di ordine più elevato, con un conseguente incremento di capacità trasmissiva, dell'ordine del 20-30%. Inoltre, le nuove piattaforme permettono di assegnare caratteristiche di protezione ed efficienza spettrale differenti a ciascun servizio trasportato, a seconda delle caratteristiche e dei requisiti commerciali dello stesso. Entrambi gli standard (DVB-S2 e DVB-T2) infatti sono sistemi di livello fisico e forniscono ai livelli superiori di protocollo un insieme di "Tubi trasparenti" (PLP nel DVB-T2, IS per il DVB-S2) in grado di trasportare flussi a bit-rate variabile con protezione differenziata (modulazione e codifica, VCM) contro il rumore e le interferenze. E' quindi possibile (con tecniche differenti) suddividere un MUX-statistico nei singoli programmi, inviare ciascuno su un PLP diverso ed ottenere su ciascuno (o su gruppi) protezione / efficienza spettrale differenziate, come schematicamente illustrato nella figura 1.

Nel terrestre poi, la modulazione multiportante (OFDM), già adottata dallo standard di prima generazione, perché più adatta a contrastare gli echi in scenari multicammino, aumenta ora il numero delle portanti, con conseguente riduzione percentuale dei tempi di guardia necessari per contrastare i fenomeni propagativi. Grazie a ciò, e alla flessibilità di scelta dei parametri di sistema, quali le portanti pilota necessarie per l'equalizzazione del canale, il DVB-T2 permette di ridurre significativamente gli overhead in modo tale da ottenere un sistema con prestazioni il più possibile prossime al limite teorico e con caratteristiche trasmissive ottimali. Indicativamente è possibile aumentare la capacità del canale del 30 - 50%, rispetto al DVB-T. Inoltre il DVB-T2 introduce tutta una serie di nuove tecniche (quali la possibilità di utilizzo di antenne multiple in trasmissione in modalità MISO (Multiple Input Single Out), riduzione dei picchi di potenza del segnale OFDM mediante le tecniche di PAPR,...) che verranno descritte in dettaglio nel resto dell'articolo e che consentono uno sfruttamento ottimale delle risorse. Globalmente i risultati sono piattaforme di seconda generazione di complessità ragionevolmente accessibile con le tecnologie attuali e prestazioni e flessibilità molto superiori rispetto ai precedenti sistemi DVB, risultanti in un "guadagno", rispetto ai sistemi di prima generazione, spendibile in duemodi:

- Aumento dell'efficienza spettrale; ovvero più bit/s/Hz. In altri termini, a parità di banda, più canali TV oppure canali TV a qualità più alta.
- Aumento dell'efficienza energetica; ovvero maggior copertura del territorio a parità di siti trasmissivi e della loro potenza; oppure diminuzione della potenza dei siti a parità di copertura del territorio.

Nella figura 2 è illustrata la curva capacità/prestazioni per i sistemi DVB-T e DVB-T2. Come si può vedere dal grafico, il guadagno del DVB-T2 può consistere in un aumento del 45÷50 % di capacità trasmissiva (in verticale) o, in alternativa, in 5÷6 dB aggiuntivi di rapporto segnale/rumore (in orizzontale) rispetto alle prestazioni assicurate dal precedente DVB-T.

Le motivazioni della scelta sul come spendere il "guadagno" sono dettate dalla spinta concorrenziale provocata dalle esigenze di mercato, che tendono generalmente verso l'aumento dell'offerta di "canali" o verso "canali" a maggiore qualità (HDTV). Le nuove piattaforme per diffusione verso terminali fissi (terrestre e satellitare) sembrano pertanto volte essenzialmente a preferire l'aumento dell'efficienza spettrale a parità di banda occupata e di impianti trasmissivi, con la motivazione "forte" di sostituire la televisione ad alta definizione a quella a qualità standard. Tutto ciò a parità di risorse frequenziali e (quasi) a parità di programmi. In alternativa, restando nel campo della qualità standard, la triplicazione dei programmi. Nel caso terrestre, quest'ultima motivazione dovrebbe far risuonare le corde di tutti gli attori della filiera televisiva, in tempi di redistribuzione delle risorse frequenziali terrestri a favore di servizi differenti dalla televisione.

REQUISITI

I principali requisiti definiti dal modulo commerciale del DVB per lo standard di seconda generazione di TV digitale terrestre comprendono:

- utilizzo degli impianti d'antenna domestici esistenti e dell'attuale infrastruttura di trasmettitori. Questo requisito, che evita il rinnovo degli impianti riceventi domestici, ha però impedito l'adozione di tecniche di trasmissione basate sulla ricezione con antenne multiple (MIMO), che pure offrono grandi vantaggi nella radiocomunicazione terrestre, limitando le innovazioni alla definizione di un sistema ad antenne trasmettenti multiple (MISO).

- incremento di almeno il 30 % della capacità trasmissiva rispetto al DVB-T, pur con gli stessi vincoli di occupazione spettrale;

- prestazioni superiori per SFN (Single Frequency Network).

- meccanismi per fornire caratteristiche di robustezza in funzione del tipo di servizio. Ad esempio è possibile, sullo stesso canale a radiofrequenza, “tagliare” servizi per la ricezione fissa con antenna sul tetto e altri servizi per la ricezione su apparati portatili.

- flessibilità relativamente a frequenze operative e larghezza di banda;

- meccanismi per ridurre il rapporto tra potenza di picco e media, ottenendo vantaggi sulle emissioni elettromagnetiche e sul costo dei trasmettitori.

Acronimi e sigle	
ACE	Active Constellation Extension
ASI	Asynchronous Serial Interface
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AVC	Advanced Video Coding
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BBFRAME	Base Band Frame
BCH	Bose, Ray-Chauduri, Hocquenghem (codice di...)
BER	Bit Error Rate
BICM	Bit Interleaved Coded Modulation
CD3	Coded Decision Directed Demodulation
CTT	Call for Technologies
CP	Continual Pilots
CPE	Common Phase Error
DA	Data-Aided
DAB	Digital Audio Broadcasting (www.dab.it)
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
DRM	Digital Radio Mondiale (www.drm.org)
DTT	Digital Terrestrial Television www.dgtv.it
DVB	Digital Video Broadcasting, (www.dvb.org)
EIT	Event Information Table
EPG	Electronic Program Guide
FEC	Forward Error Correction
FEF	Future Extension Frame
FFT	Fast Fourier Transform
GSE	Generic Stream Encapsulation
HDTV	High Definition TeleVision
ISDB-T	Integrated Services Digital Broadcasting -Terrestrial (www.dibeg.org)
IRD	Integrated Receiver Decoder
IP	Internet Protocol
IS	Input Stream
ITU	International Telecommunication Union (www.itu.int)
LDPC	Low Density Parity Check
MFN	Multi Frequency Network
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
MPEG	Motion Picture Expert Group
MMRC	Maximal Ratio Receive Combining
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PAL	Phase Alternating Line
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PLP	Physical Layer Pipe
PCR	Program Clock Reference
PSI/SI	Program Service Information/ Service Information
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
RS	Reed-Solomon (codice di...)
SFN	Single Frequency Network
SP	Scattered Pilots
SISO	Single Input Single Output
TFS	Time Frequency Slicing
TR	Tone Reservation
TS	Transport Stream
VCM	Variable Coding & Modulation

Overview del sistema DVB-T2

La specifica DVB-T2 comprende le seguenti caratteristiche principali:

- Stessa tecnica base di modulazione utilizzata dal DVB-T, OFDM con intervallo di guardia, che garantisce un sistema di trasmissione affidabile su canali terrestri.
- Dimensioni di FFT estese rispetto al DVB-T, per migliorare le prestazioni in configurazioni di rete a frequenza singola (SFN) e, congiuntamente, incremento dei possibili valori degli intervalli di guardia, per offrire maggiore flessibilità di scelta di configurazione del sistema, in relazione alle caratteristiche della rete di trasmissione, e garantire un'efficienza trasmissiva significativamente più elevata rispetto al DVB-T
- Tecnica di suddivisione dei dati in trame (frame) di banda base (BBFRAME) e codifica di canale (FEC) analoghe a quella del DVB-S2.
- Stesse costellazioni del DVB-T (4-, 16-, 64-QAM), con estensione alla 256-QAM, per sfruttare a pieno i vantaggi derivanti dall'impiego della nuova generazione di FEC. Introduce

la tecnica delle costellazioni ruotate che consente di migliorare significativamente le prestazioni del sistema in canali terrestri particolarmente critici.

- Metodo per trasportare servizi differenti con differenti gradi di protezione, in un unico canale fisico, ma diversi canali logici, denominati PLP. Ciascun PLP adotta FEC ed Interleaving indipendenti, consentendo così di adattare le caratteristiche di robustezza della codifica ai requisiti del particolare servizio convogliato. Ciò consente inoltre il “Time slicing” nello strato fisico, per un risparmio energetico nel ricevitore, che può rimanere acceso solo negli intervalli temporali in cui è presente il servizio di interesse.

- Quattro livelli di interallacciamento dell'informazione (Bit, Cella, Tempo e Frequenza), per fronteggiare meglio i diversi tipi di degradamento del segnale sul canale terrestre. L'interleaving temporale offre una profondità di interlacciamento di almeno 70 ms per i servizi a rate più elevati, con l'opzione di poter estendere tale valore senza necessità di incrementare la memoria del ricevitore. Ciò consente di ottenere una maggiore immunità a disturbi di tipo impulsivo e può consentire una migliore ricezione in condizioni di mobilità a velocità elevate.

- Struttura di trama flessibile, in cui i dati possono essere dispersi sull'intera trama per avere la massima diversità temporale oppure concentrati in bursts per consentire il massimo risparmio energetico nel ricevitore. La struttura di trama prevede un'efficiente segnalazione di livello fisico per trasferire i parametri di trasmissione al ricevitore: il simbolo P1 serve per sincronizzazione di trama e per rivelazione rapida del segnale DVB-T2; i simboli P2 trasportano dati che descrivono la struttura della trama (segnalazione L1) e informazioni di tipo PSI/SI

- Ampliamento dei possibili segnali per la sincronizzazione e la stima del canale radio (segnali pilota di tipo scattered e di tipo continuo) che possono essere scelti sulla base del particolare ambiente trasmissivo (8 possibili configurazioni di dispersione di celle pilota).

- Possibilità di trasmissione con antenne multiple, basata sulla tecnica di Alamouti, che consente di migliorare la ricezione di segnali di pari livello provenienti da due trasmettitori.

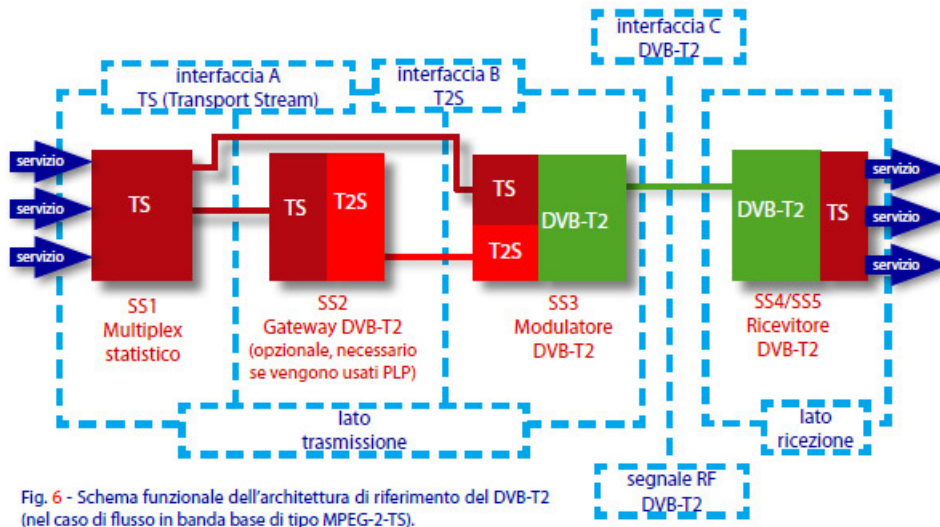
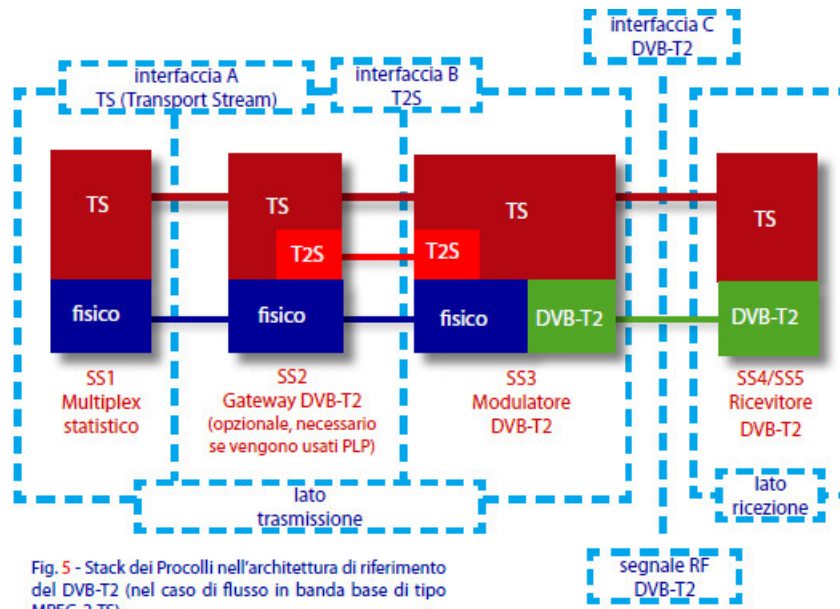
- Meccanismi (due distinti, basati l'uno sulla tecnica “tone reservation” e l'altro sulla “constellation distortion”) per ridurre il rapporto tra potenza di picco e potenza media del segnale trasmesso (PAPR).

- Segnalazione (a basso livello di potenza) per l'identificazione del trasmettitore.

- Meccanismi per permettere in futuro l'introduzione nel sistema di ulteriori tecniche preservandone la compatibilità all'indietro: TFS e FEF.

Aspetti architetturali

Stack protocollare e schema funzionale di riferimento:



Flussi in ingresso

Come nello standard DVB-S2 il sistema è progettato per adattarsi a qualunque formato dei flussi di dati in ingresso, primi tra tutti i “tradizionali” flussi MPEG TS, singoli o multipli, ma anche IP e ATM, attraverso flussi generici GSE singoli o multipli, a pacchetti o continui. Questo fa sì che l’eventuale futura definizione di altri formati, possa essere recepita senza modifiche al sistema. Inoltre l’architettura del DVB-T2 non pone nessun vincolo alla possibilità che ciascun PLP trasporti un flusso di tipo TS o GSE. Per trasportare differenti servizi con differenti gradi di protezione, in un unico canale fisico, il DVB-T2 definisce i PLP.

Trama e Protezione dell'informazione

La trama denominata “FEC frame” (Forward Error Correction frame) è l’unità dati fondamentale. La sua lunghezza è fissa ed è generalmente pari a 64.800 bit; tuttavia è anche prevista, in alternativa, una lunghezza di 16.200 bit (come per il DVB-S2), che rende possibili applicazioni a bassi bit-rate con latenza ridotta.



Fig. 8 - Trama di banda base e codifica FEC.

Nell’ottica di garantire un elevato grado di compatibilità con lo standard satellitare DVB-S2, lo standard DVB-T2 ha previsto, pur con opportune estensioni per migliorarne l’efficienza, meccanismi compatibili con quelli già definiti nello standard DVB-S2 sia per l’elaborazione dei dati in ingresso, sia per le tecniche di correzione d’errore (FEC). Le prestazioni dei codici corti (FEC frame=16200 bit) risultano qualche decimo di dB peggiori di quelle dei codici lunghi (FEC frame=64800 bit).

Modulazione

La tecnica definita dal DVB-T2 riprende quella già utilizzata dallo standard DVB-T (ed anche da altri standard di diffusione a radiofrequenza, quali DAB, ISDB-T, DRM ed altri): la modulazione OFDM con intervallo di guardia. Nella modulazione OFDM ogni simbolo trasporta dati su un numero molto elevato di portanti distinte, e l’intervallo di guardia, ripetizione ciclica della porzione utile di simbolo, “assorbe” l’interferenza intersimbolica generata dagli echi di propagazione, tipici della ricezione in ambiente terrestre. Per il soddisfacimento dei requisiti di carattere commerciale, i parametri che definiscono la modulazione OFDM sono stati opportunamente estesi rispetto al DVB-T.

Costellazioni

Per quanto riguarda le costellazioni di modulazione utilizzabili, lo standard DVB-T2 aggiunge a quanto previsto nella specifica DVB-T (QPSK, 16-QAM, 64-QAM), la tecnica 256-QAM (figura 11) che permette il trasferimento di 8 bit per simbolo. Ciò è reso possibile dalla maggiore efficienza della codifica FEC basata sui codici LDPC utilizzati dal DVB-T2 rispetto a quelli adottati per il DVB-T: tale efficienza garantisce la possibilità di operare come se i rapporti segnale/rumore fossero maggiori di quelli effettivi.

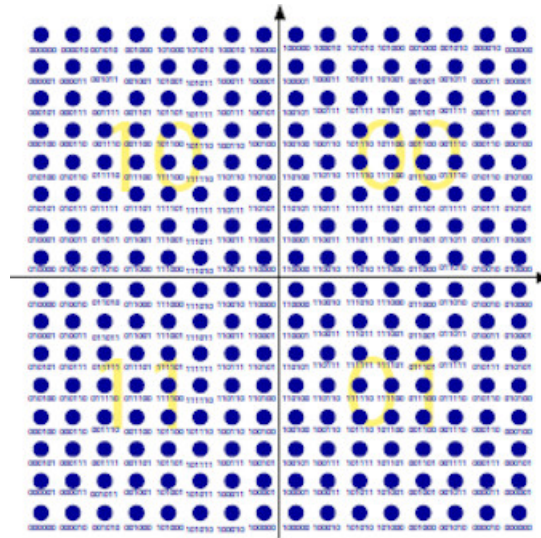


Fig. 11 - Costellazione 256-QAM. Ad ogni simbolo sono associati 8 bit, di cui i due più significativi identificano il quadrante di appartenenza.

Se ciò non fosse, infatti, essendo la distanza euclidea tra punti adiacenti della costellazione 256-QAM, circa la metà di quella dei punti della 64-QAM, la più elevata sensibilità al rumore della prima dovrebbe essere compensata con un corrispondente aumento del rapporto segnale/rumore.

Sincronizzazione e stima del canale

Il segnale DVB-T2 è progettato in modo tale da facilitare la sincronizzazione dei ricevitori in tempo e frequenza. Ciascuna trama è suddivisa in preambolo e payload, così come riportato graficamente in figura 15. Il preambolo è costituito da un simbolo denominato P1 e da un certo numero di simboli P2, dipendente dalla dimensione della FFT utilizzata: per sistemi con 32K e 16K vi è solamente un simbolo P2; per sistemi 8K, 4K, 2K e 1K sono presenti rispettivamente 2, 4, 8 e 16 simboli P2. Segue il payload vero e proprio, (anche se alcuni dati possono essere già trasportati da simboli P2) che consiste di simboli OFDM le cui sottoportanti possono essere modulate da simboli di dati o da simboli pilota predefiniti.

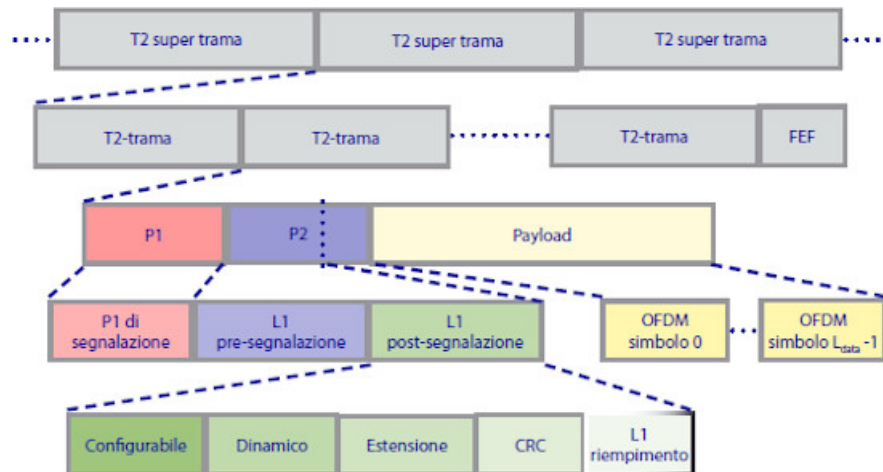


Fig. 15 - Struttura di trame e super-trame del DVB-T2.

Trasmissione con antenne multiple

Lo standard DVB-T2, come già il DVB-T, consente la trasmissione simultanea del segnale sulla stessa frequenza da parte di differenti trasmettitori al fine di realizzare una rete a singola frequenza (SFN).

Lo standard DVB-T2 introduce, come opzione, l'uso di una strategia che prevede la trasmissione di due segnali differenti da parte di due trasmettitori adiacenti, secondo la tecnica di Alamouti. Si tratta di un approccio efficiente per sfruttare la presenza di molteplici antenne trasmissive, utile anche nel caso in cui il ricevitore sia equipaggiato con un'antenna singola (MISO). Con ciò si ottiene un incremento di copertura in reti SFN.

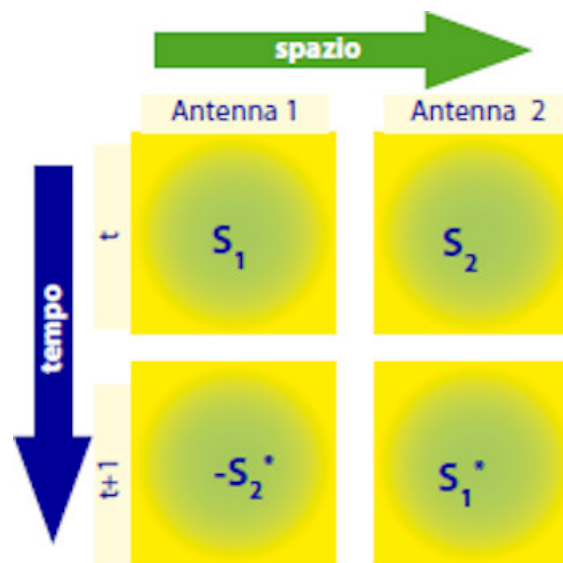


Fig. 19 - Codifica di Alamouti in Spazio (due antenne trasmettenti) - Tempo.

I segnali delle due antenne trasferiscono gli stessi dati ma codificati in maniera differente in spazio e frequenza” (SF coding), secondo una variante della tecnica Alamouti, in modo tale che, in ricezione, sia possibile combinarli in maniera semplice per ottenere la decodifica ottima dei simboli originali.

Prestazioni DVB-T e DVB-T2 a confronto

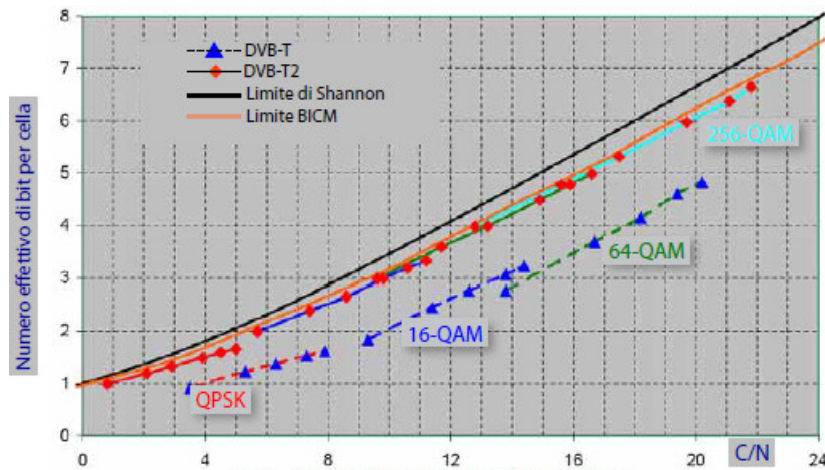


Fig. 23 Capacità del DVB-T e del DVB-T2 a confronto.

Tab. 4 - Valutazione di una configurazione tipica di SFN adottata in Italia e relativo confronto con una equivalente in DVB-T2.

	Modalità corrente DVB-T nei MUX nazionali SFN	Esempio DVB-T2
Canale RF	8 MHz	8 MHz
Modulazione	64 QAM	256 QAM
Dimensione FFT	8K	32K
Intervallo di guardia (CP)	1/4	1/16
FEC	2/3 CC + RS (8%)	3/5 LDPC + BCH (0,3%)
Config. Scattered Pilots	—	PP7
% overhead per Scattered Pilots	8 %	1 %
% overhead per Continual Pilots	3 %	0,53 %
% overhead per P1 / P2	0 %	0,7 %
Occupazione banda	normale	estesa
SNR in ricezione	17 dB	17 dB
Capacità netta	19,9 Mbit/s	34,2 Mbit/s
Guadagno in capacità		72 %
n. Programmi SDTV	≈ 4 MPEG-2	≈ 15 MPEG-4 AVC
n. Programmi HDTV		≈ 4 MPEG-4 AVC

Considerazioni generali

Dalle specifiche DVB-T2 illustrate in precedenza emerge quanto segue:

- Si tratta di un ottimo standard che richiede però uno sviluppo completamente nuovo di tutta l'elettronica per la codifica di sorgente e di canale, pertanto sarà necessaria la sostituzione degli IRD (Integrated Receiver Decoder) domestici.
- Si presenta come uno standard stabile (con improbabili evoluzioni a tempi brevi) perché l'efficienza spettrale è prossima al limite teorico (Shannon). L'impegno per la sostituzione degli IRD, sarà quindi compensato da una loro lunga durata nel tempo.
- I siti di trasmissione e gli impianti d'antenna domestici non dovrebbero richiedere modifiche.
- Lo standard è molto flessibile, sia in termini di varietà dei dati in ingresso (non limitati al TS) sia per la possibilità di rendere più robusta la trasmissione di servizi/programmi di particolare interesse o destinati ad un'utenza in condizioni critiche di ricezione.
- Lo standard rappresenta il driver per l'introduzione dei servizi HDTV. L'impiego dello standard DVB-T2 congiuntamente a codifiche video di ultima generazione (MPEG-4 AVC) consente di ottenere un guadagno di capacità trasmissiva utilizzabile per introdurre servizi HDTV a costo quasi nullo in termini di occupazione di banda.

RTG (Italia)

Viene ora descritta sommariamente la rete italiana, detta **RTG** = Rete telefonica generale (in inglese PSTN = Public Switched Telephone Network), secondo i dati forniti pubblicamente da TelecomItalia nel 2014.

"In Italia una **centrale telefonica** può essere uno Stadio di Linea (**SL**), uno Stadio di Gruppo Urbano (**SGU**) oppure uno Stadio di Gruppo di Transito (**SGT**). Lo Stadio di Linea è l'ultima struttura dove possono arrivare tutti gli altri provider con i loro apparati, dopodiché inizia il famoso ultimo miglio che giunge fino all'utente e in Italia è di proprietà di Telecom Italia. I **10500** Stadi di Linea sono collegati ad uno dei **628** Stadi di Gruppo Urbano, che a loro volta sono connessi ad uno dei **65** Stadi di Gruppo di Transito (le centrali interurbane).

Questi ultimi sono connessi tra di loro per poter smistare le chiamate interurbane dando così luogo alle **dorsali** (backbone) principali della rete telefonica nazionale. La rete telefonica ha dunque una tipica struttura **capillare**. Per completare l'architettura fisica della rete (topologia), alcuni SGT sono connessi ad uno dei **3 gateway internazionali** (in Italia a: Milano, Roma e Palermo), che a loro volta sono connessi con i gateway di altre nazioni per le comunicazioni internazionali

Architettura

I 10.500 stadi di linea (che coprono i circa 8000 comuni italiani) sono collegati con cavo interrato o ponte radio a 650 stadi di gruppo urbano a capacità non inferiore a 155 Mbit/s. La numerizzazione degli stadi di linea si è conclusa a metà degli anni novanta; attualmente la rete telefonica locale

italiana è servita da centrali di tre diversi costruttori: Italtel Linea-UT100 (66,6% degli stadi di linea), Alcatel A1000 S12 (17,3%) ed Ericsson AXE10 (16,1%).

Ogni SGU è connesso, oltre ai suoi stadi di linea, agli SGU limitrofi e al suo stadio di gruppo di transito (SGT) tramite fibre ottiche. Ogni fibra può trasportare da 622 a 2500 Mbit/s. Gli SGT sono connessi tra di loro con una rete a maglia completa. Gli SGT sono connessi ai tre gateway internazionali (situati a Milano, Roma e Palermo), che a loro volta sono connessi a centri intercontinentali (per il traffico diretto verso gli USA il sito è nei Paesi Bassi). Il traffico è trasportato oltre Atlantico da fibre con capacità attuali di 40 Gbit/s (625.000 canali telefonici equivalenti).

Da ognuno dei 10.500 stadi di linea partono fasci di cavi (detti cavi di rete primaria) fino 2400 coppie che arrivano a vari armadi ripartilinea ubicati nelle strade. Da questi partono altri cavi (detti cavi di rete secondaria) che raggiungono i distributori o le chiostrine, ovvero piccoli box o colonnine grigie che contengono una morsettiera con capacità tipica di 10 coppie a cui viene collegato, da un lato, il cavo telefonico proveniente dall'armadio ripartilinea, e dall'altro il cavo con destinazione sede dell'utente (presa tripolare o RJ-11). Ciò completa l'architettura dell'attuale rete Telecom Italia. Le velocità di collegamento fra centrali dipendono dalla densità del traffico della zona, a sua volta legato al numero di utenze, ma in passato erano diverse le bande assegnate: 2 Mbit/s (30 canali telefonici), 8 Mbit/s (120 canali) fino ad arrivare a 139 Mbit/s (1800 canali telefonici), per ogni cavo o fascio radio a microonde utilizzato.

ADSL

Alcuni Stadi di Linea sono esclusi dalla copertura ADSL perché non collegati alle altre centrali di gerarchia superiore (Stadio di Gruppo) tramite fibra ottica e perché sprovvisti di appositi moltiplicatori detti DSLAM. Poiché il costo al metro del rame è di parecchio inferiore a quello della fibra ottica, nelle zone non ancora raggiunte dall'ADSL un modo per estendere tale copertura, sarebbe quello di inserire uno splitter che separi voce e dati e convogli il traffico-dati (Internet soprattutto) su un doppino tirato dallo Stadio di Linea non coperto fino alla vicina centrale telefonica coperta da ADSL allacciandolo al rispettivo DSLAM in modo che il segnale a banda larga giunga anche alla centrale inizialmente non coperta (anche se la disponibilità di banda in quest'ultima centrale sarà comunque di molto inferiore).

Permutatori

In centrale si trovano i permutatori, composti da strisce e blocchetti. Il permutatore è una struttura, di dimensioni variabili a seconda del numero di utenze servite dalla centrale, divisa principalmente in due parti. La prima è composta da blocchetti, disposti orizzontalmente, collegati elettricamente alle schede di centrale che generano i segnali di telefonia analogica, ISDN e quelli relativi ai vari servizi di trasmissione dati come ADSL, HDSL, VDSL2, ecc. La seconda è composta da strisce, poste in verticale, collegate ai cavi che sviluppano la rete esterna e quindi collegate direttamente agli appositi armadi posti in strada e da questi ai box che servono una o più

abitazioni. Blocchetti e strisce sono collegati tra loro tramite permutazioni (treccie di rame) che destinano ogni singola linea telefonica alla relativa posizione sulla striscia. ". (*Wikipedia*)

La descrizione sopra riportata contiene forse alcune imprecisioni, ma sostanzialmente mostra la situazione attuale, che comunque è in continua evoluzione, come è logico che sia. Attualmente, ad esempio, gli **SGT** che formano il backbone (dorsale) sono connessi tramite **protocollo IP**.

Le reti di telecomunicazioni TIM a marzo 2018

Riporto una parte del TIM-Netbook-1Q2018 che descrive lo stato attuale dell'infrastruttura di rete in Italia.

"Per quanto si parli per esempio di "reti telefoniche" e "reti a banda larga" come se fossero oggetti separati e distinti, questa indipendenza e autonomia non trova una completa corrispondenza nella realtà. La rete telefonica e la rete di accesso internet a banda larga sono oggetti separati, in quanto gli apparati che gestiscono e che smistano i due differenti flussi di traffico sono oggetti differenti. Tuttavia, bisogna tenere distinte le attività di gestione e smistamento dei flussi di informazioni (voce, dati, video, ecc.) dall'attività di trasferimento fisico dei flussi stessi: quest'ultima infatti avviene utilizzando le medesime strutture portanti (fibra, cavi in rame, ponti radio) e i medesimi apparati di trasmissione per entrambe le reti considerate.

Queste infrastrutture comuni, che costituiscono una parte integrante assolutamente indispensabile per il funzionamento delle due reti di servizio, prendono il nome di rete trasmissiva. Le reti monoservizio (rete telefonia vocale, rete linee affittate, rete a banda larga, ecc.) rispetto alla rete trasmissiva sono quindi interdipendenti.

Per capire meglio questa realtà, forse è utile fare un paragone con il settore postale, e dire che quando si fa riferimento alla rete telefonica o alla rete a banda larga stiamo facendo riferimento a due diversi addetti che lavorano alle poste: uno si occupa di smistare le lettere, mentre l'altro si occupa di smistare i pacchi.

Una volta però che questa operazione di smistamento è stata effettuata, le lettere e i pacchi sono recapitati utilizzando gli stessi mezzi di trasporto (furgoni, aerei, posta pneumatica). Questo è quel che avviene anche per le differenti reti di telecomunicazioni: una volta che lo specifico apparato (ad esempio un autocommutatore voce) ha gestito un flusso relativo a una chiamata voce, ha cioè individuato il percorso che la chiamata deve fare per arrivare a destinazione, il trasporto del flusso da una centrale all'altra verrà effettuato utilizzando le stesse portanti e gli stessi apparati di trasmissione che usano le reti dati.

Questo processo, in realtà, accade solo nelle aree periferiche della rete. Infatti "la separazione dei compiti" ovvero la specificità degli apparati rispetto alla tipologia del servizio erogato (servizi voce tradizionali, servizi di accesso ad internet a banda larga, ecc.) si riscontra unicamente nelle centrali periferiche, ovvero ai livelli gerarchici di rete più bassi.

Al contrario, nelle centrali più importanti, che costituiscono i livelli gerarchici di rete più alti, gli apparati adibiti specificatamente a gestire un solo tipo di traffico tendono a scomparire e ad essere sostituiti con apparati che gestiscono differenti tipologie di servizio. Questi apparati sono i **Router IP**.

Non tutte le tipologie di traffico tuttavia nascono in un formato compatibile con quello dei Router IP. Ad esempio, i flussi di traffico relativi ai servizi di telefonia vocale tradizionali per essere veicolati e gestiti dai Router IP richiedono un trattamento preventivo. I servizi di telefonia vocale rispondono infatti a **logiche di instradamento a commutazione di circuito**, cioè la comunicazione tra i due interlocutori è garantita dalla creazione di uno specifico canale trasmissivo dedicato che consente il flusso continuo e ininterrotto da un estremo all'altro.

Al contrario, nella commutazione di pacchetto - tipica delle reti IP - il flusso di dati è suddiviso in tanti piccoli "pacchetti", appunto, che possono arrivare a destinazione seguendo percorsi differenti e che occupano risorse trasmissive solo nel momento in cui si presenta un'effettiva necessità. Per consentire anche ai flussi di traffico relativi a servizi di telefonia vocale tradizionali di poter essere gestiti da una rete IP è quindi necessario provvedere alla "pacchettizzazione" della voce, processo che viene svolto da specifici apparati della rete telefonica che prendono il nome di **BBN (Backbone Nazionale)**.

Poiché il Router IP può gestire flussi di traffico di natura diversa utilizzando la commutazione di pacchetto, si raggiunge una maggiore efficienza nell'utilizzo delle risorse trasmissive, nel senso che i collegamenti raggiungono un "fattore di riempimento" maggiore e quindi, a parità di capacità trasmissiva nominale, si riesce a trasportare una maggior quantità di informazioni. L'utilizzo di un unico apparato permette infatti di passare da una gestione che prevede risorse di trasmissione preventivamente e staticamente assegnate (per tornare alla nostra metafora, immaginiamo che la parte del furgoncino dedicata al trasporto delle lettere e quella dedicata al trasporto dei pacchi siano fissate a priori in modo statico) a una gestione in cui l'assegnazione della risorsa trasmissiva (lo spazio dedicato all'interno del furgoncino) cambia al variare delle specifiche esigenze del momento. È evidente come la gestione congiunta di diverse tipologie di traffico consenta di conseguire importanti economie di scala e di scopo.

La flessibilità e la capacità di adattamento delle reti IP è peraltro un fenomeno che hanno ormai imparato a constatare gli utenti internet. Basta infatti pensare alla semplicità con la quale attraverso un unico collegamento a banda larga è oggi possibile usufruire di molteplici e svariati servizi (e-mail, fonia, instant messaging, videoconferenza, ascolto di brani musicali, visione di filmati, ecc.). Ma ancora più sorprendente è il fatto che questa pluralità di servizi venga offerta senza alcuna necessità di intervento sulla rete. I meccanismi che regolano oggi il funzionamento della rete internet fanno sì che questa gestisca i flussi relativi a qualsiasi tipo di servizio in modo del tutto indifferenziato.

Un trattamento indifferenziato dei diversi flussi di traffico che, se per certi aspetti va considerato un fattore positivo, rappresenta anche **uno dei principali limiti della rete internet**, in quanto sconsiglia l'utilizzo di questa piattaforma per offrire alcuni servizi che, per

loro stessa natura, richiedono necessariamente che si rispettino in modo rigoroso determinati parametri di qualità (ad esempio il telecontrollo di un robot che compia un'intervento chirurgico su un essere vivente).

La rete trasmissiva è la principale “risorsa comune” che entra in gioco per trasportare le informazioni raccolte da tutte le reti - siano esse voce o dati - inviate da terminali fissi o in mobilità, analogici o digitali.

GLI ELEMENTI COSTITUTIVI DELLE RETI DI TRASMISSIONE E LE TECNOLOGIE UTILIZZATE

La rete trasmissiva può pertanto essere vista come lo strato “di servizio” per tutte le altre reti; una qualunque comunicazione fra due elementi di rete (per esempio le centrali di commutazione, i router, ecc.) può avvenire solo usando i **servizi** messi a disposizione dalla **rete trasmissiva**, che sono:

- **trasporto dei flussi tra i nodi delle reti di TIM** per tutti i servizi erogabili (fonia, ATM, IP, ecc.), sia nazionale che internazionale;
- **trasporto flussi per gli altri Operatori** (operatori alternativi di rete fissa e operatori di rete mobile). Gli elementi costitutivi della Rete di Trasporto, intesi come le infrastrutture che trasportano i flussi tra tutti i nodi della rete, sono di due tipi: le portanti e gli apparati trasmissivi.

Le portanti sono gli elementi di trasporto “fisico” del segnale e comprendono i **cavi** (che possono essere in **fibra ottica e in rame**) e i **ponti radio**. Gli apparati trasmissivi sono invece quelle apparecchiature elettroniche che presiedono alle funzioni di trasmissione del segnale e che quindi aggregano, disaggregano, rigenerano e smistano i flussi di dati ricevuti. Si definisce invece **nodo trasmissivo** un punto della rete in cui arriva una portante (ossia un collegamento fisico) e dove sono presenti degli apparati trasmissivi.

L'obiettivo è stato quello di modificare le infrastrutture della rete trasmissiva, accompagnandone il passaggio da strutture per il trasporto di servizi a circuito in strutture innovative capaci di trasportare efficientemente i nuovi servizi IP. Questo processo evolutivo è stato ed è tuttora guidato dai seguenti principi: fare un uso efficiente delle risorse di rete ottimizzando gli investimenti, rendere automatiche alcune funzionalità di rete riducendo i costi e sfruttare i vantaggi offerti dalle nuove tecnologie che consentono di offrire maggiori capacità a minor costo. La rete trasmissiva nazionale, infatti, nel corso degli ultimi vent'anni ha attraversato tre importanti fasi di sviluppo tecnologico.

Fino alla fine degli Anni '90, la rete utilizzava la tecnologia **PDH** (Plesiochronous Digital Hierarchy), la quale presuppone che l'instradamento dei flussi dal nodo di origine a quello di destinazione avvenga attraverso il passaggio in nodi intermedi, e pertanto richiede la realizzazione di una struttura di rete a “stella” o a “maglie”.

Nel 1996 è stata introdotta la rete trasmissiva con tecnologia **SDH** (Synchronous Digital Hierarchy), costruita su uno standard riconosciuto a livello internazionale. La **rete Arianna**, realizzata a partire dal 1999, è stata la prima rete SDH nazionale e presentava un'**architettura ad anelli** (su 4 o 6 nodi) aventi velocità pari a **2,5 Gbit/sec**. L'SDH, rispetto al PDH, consente di realizzare strutture ad anello con un uso più efficiente delle risorse, strutture che garantiscono il controllo della qualità dei flussi e una maggiore flessibilità in termini di instradamento e di allocazione della capacità. La tecnologia SDH assicura inoltre maggiore affidabilità, in quanto il traffico può essere trasportato in entrambi i sensi di percorrenza dell'anello (orario e antiorario). La rete Arianna, tuttavia, era nata per gestire un traffico di tipo vocale, tipicamente statico e con elevati livelli di qualità in termini di disponibilità del servizio (ovvero la durata complessiva di tutti i guasti verificatisi nel corso di un anno doveva presentare valori molto contenuti). Nel momento in cui traffico e servizi IP hanno iniziato a svilupparsi in maniera significativa, l'architettura di rete ha evidenziato limiti di flessibilità, scalabilità, efficienza e integrazione con le tecnologie più innovative. Per superare questi limiti, dalla fine del 2003 è iniziata la realizzazione della **rete Phoenix**, anch'essa con tecnologia SDH, ma organizzata su una maglia di 40 nodi di tre tipologie, suddivisi in base alla capacità equivalente implementata: 80 Gbit/sec, 320 Gbit/sec e 960 Gbit/sec.

A partire dal 1999, parallelamente alla diffusione delle reti a tecnologia SDH, è iniziato anche lo sviluppo di **reti fotoniche**. I termini "trasmissione ottica" e "trasmissione fotonica" non sono del tutto equivalenti: entrambi si riferiscono alla trasmissione su fibra ottica, ma quando si parla di fotonica si intende generalmente qualcosa di più. Ad esempio, un apparato SDH con trasmettitori (laser) e ricevitori (fotodiodi) per la trasmissione su fibra è sicuramente classificabile come apparato ottico, ma la sua principale caratteristica è quella di trattare i segnali nel dominio elettronico: per svolgere le sue funzioni deve necessariamente trasformare il segnale da ottico a elettrico e poi di nuovo in ottico per trasmetterlo nuovamente. Un **apparato fotonico**, al contrario, è un apparato che non solo è in grado di trasmettere segnali su fibra ottica, ma può **svolgere le sue funzioni lasciando il segnale nel dominio ottico, o meglio fotonico**.

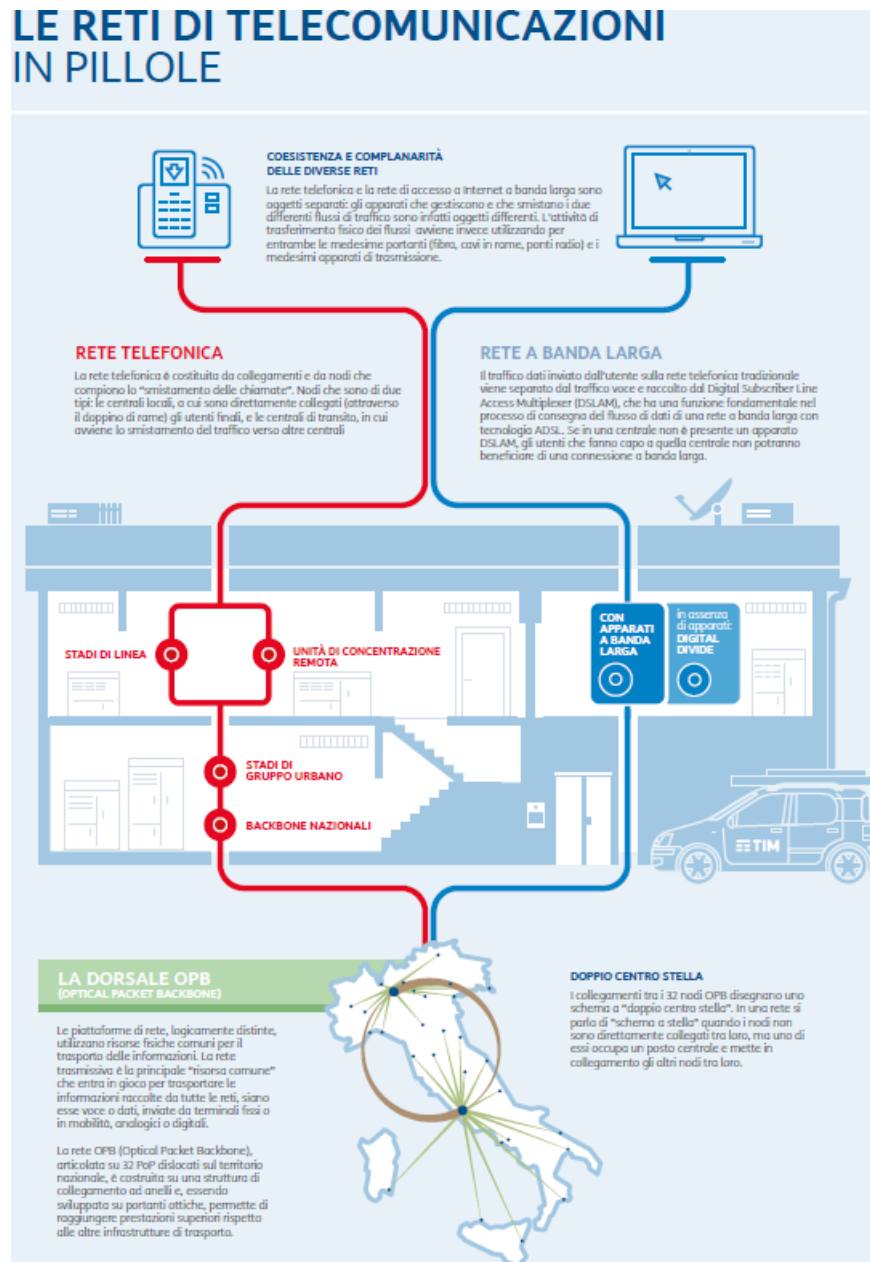
Questo cambiamento ha richiesto un significativo adeguamento della rete di trasporto: la riprogettazione della struttura topologica dell'infrastruttura e l'introduzione di nuove tecnologie.

La **rete OPB** (Optical Packet Backbone) è interamente costruita su una struttura di collegamento ad anelli e, essendo sviluppata su portanti ottiche, permette di raggiungere **prestazioni nettamente superiori** rispetto alle altre infrastrutture di trasporto. Questa progressiva evoluzione della Rete di Trasporto ha comportato l'utilizzo di **sistemi WDM** (Wavelength Division Multiplexing) a supporto delle reti IP e SDH già esistenti. La **tecnologia WDM** (che è **FDM** Frequency division Multiplexing), permettendo di aggregare in uno stesso segnale ottico flussi trasmissivi appartenenti a comunicazioni differenti, determina significativi benefici in termini di efficienza complessiva del trasporto.

Le reti di lunga distanza sono state le prime a beneficiare dei vantaggi offerti dalla trasmissione WDM: un **singolo amplificatore ottico** bidirezionale (tipico della tecnologia fotonica) può infatti **sostituire un certo numero di rigeneratori elettro-ottici** utilizzati nella tecnologia

PDH e SDH. Grazie all'introduzione del WDM è stato possibile **ridurre drasticamente sia il numero di apparati, sia il numero di fibre.**

In ambito regionale e metropolitano l'introduzione della tecnologia WDM è avvenuta solo agli inizi degli anni 2000. Da ultimo, la parte più periferica della rete, nota come **Metro-Access**, ha visto l'introduzione delle tecnologie di trasporto in fibra multi canale: si tratta del sistema **CWDM** (Coarse Wavelength Division Multiplexing), che è diventato quindi la soluzione trasmissiva primaria adottata dagli Operatori per raccogliere e proteggere le grandi quantità di traffico dati generate sia dalla clientela di rete fissa sia da quella di rete mobile.



GLI ELEMENTI COSTITUTIVI DELLE RETI A BANDA LARGA

Per comprendere quali sono gli elementi che permettono all'utente di accedere a internet a banda larga utilizzando l'attualerete in rame, è necessario distinguere due diversi contesti: il contesto in cui viene "originato" il traffico (**lato utente**) e quello in cui traffico è "raccolto" (**lato centrale**).

Prendendo in esame il contesto lato utente, è opportuno chiarire che l'**ADSL** è una tecnologia compatibile con il trasporto contemporaneo sullo stesso doppino di due tipologie di traffico, la voce e i dati, che per loro natura sono prodotti in due differenti formati, analogico (la voce) e digitale (i dati). Per effettuare questa operazione sono necessari diversi apparati, che svolgono funzioni differenti:

- il **modem**, che ha il compito di trasformare le informazioni digitali dei computer in segnali elettrici, trasportabili sulle tradizionali reti analogiche;
- lo **splitter**, che permette di separare le bande di frequenza destinate ai due diversi segnali ed evita che si creino delle interferenze tra voce e dati;
- il **router**, che consente di connettere alla rete a banda larga più apparati e ha il compito di instradare e gestire il traffico di una rete locale. In alcuni casi, tali funzioni sono svolte da apparati fisicamente distinti; in altri, sono svolte da un unico apparato che sovrintende a tutte le funzioni. Per seguire il percorso del flusso di traffico una volta uscito dall'abitazione dell'utente, è necessario ripartire logicamente la rete in tre livelli:
- il **livello inferiore**, che include le centrali presso le quali arriva, per essere "lavorato", il flusso di informazioni che esce dall'abitazione dell'utente, nonché le risorse della rete trasmissiva che collegano abitazione e centrale;
- il **livello intermedio**, dove il traffico in uscita dalle centrali viene raccolto e indirizzato verso la **dorsale IP Multiservizio** o **rete OPB**, l'infrastruttura che presiede al trasporto a livello nazionale;
- il **livello superiore**, che include i nodi della rete OPB e le connessioni tra questi punti. Al livello inferiore il traffico dati inviato dall'utente viene separato dal traffico voce mediante uno splitter e raccolto dal **Digital Subscriber Line Access Multiplexer**, detto più semplicemente **DSLAM**, dove terminano le linee ADSL degli utenti attestati a quella centrale. Nel percorso che il traffico fa dall'utente verso la rete, il DSLAM svolge **due diverse funzioni**:

1. attraverso i demodulatori xDSL, demodula il segnale, ossia converte i segnali digitali elettrici ricevuti (in cui era stato trasformato per essere portato sulla rete in rame) in segnali digitali - una sequenza di simboli 0 e 1 - per poterlo poi "lavorare" e trasferire nella rete a commutazione di pacchetto.

2. successivamente, il traffico viene inviato verso i **Service Access Multiplexer (SAM)** che hanno il compito di raccogliere più flussi di traffico - originati da utenti differenti - e di unirli

(multiplarli) in un unico flusso. Una volta aggregati più flussi in uno, il traffico viene indirizzato verso i livelli di rete superiori (**rete di transito**) che hanno una capacità di banda maggiore, generalmente in fibra ottica. Il DSLAM ha una funzione fondamentale nel processo di consegna del flusso di dati di una rete a banda larga con tecnologia ADSL: se in una centrale non è presente un apparato DSLAM, gli utenti attestati in quella centrale non potranno beneficiare di una connessione a banda larga.

Nella rete di TIM sono presenti **due generazioni di DSLAM**: i DSLAM che operano con la tecnica dell'**Asynchronous Transfer Mode (DSLAM ATM)** e quelli che adottano l'**Ethernet Protocol (DSLAM Ethernet)**. Comunemente, questi ultimi apparati sono denominati **DSLAM IP** per evidenziare il **forte legame che vi è tra il protocollo Ethernet e l'Internet Protocol (IP)**. Nel resto della pubblicazione tali apparati sono denominati IP-DSLAM Ethernet.

La tecnologia **ATM** opera raccogliendo il **flusso di traffico** dell'utente, una volta ridigitalizzato dal demodulatore, dividendolo **in celle di uguale dimensione**. Ogni cella è identificata da un'intestazione in cui sono raccolti dati sul contenuto informativo presente nella cella e sulle modalità secondo cui la cella deve essere trattata dalla rete. A differenza delle tecniche a commutazione di pacchetto, che non definiscono il percorso che deve effettuare ogni pacchetto per giungere a destinazione, l'ATM opera in altro modo: una volta inviata la prima cella, le successive vengono riconosciute dalla rete che le indirizza lungo lo stesso percorso effettuato dalla prima, nello stesso ordine con cui sono inviate. È questa particolarità che ha fatto definire **l'ATM come una tecnica a commutazione di "circuito virtuale"**.

Inizialmente erano previste soluzioni di trasporto a banda larga completamente in ATM. Tuttavia, il diffondersi di apparati Ethernet e IP, dovuta al repentino sviluppo di Internet e alla crescita delle prestazioni offerte da tali protocolli di rete, ha progressivamente determinato un cambiamento delle logiche di progettazione delle infrastrutture a banda larga con **sostituzione di soluzioni ATM con soluzioni IP**.

In molte reti di telecomunicazione **convivono ancora oggi sia soluzioni di trasporto ATM, sia Ethernet e IP**, con queste ultime che stanno gradualmente sostituendo le prime. Da questo punto di vista, la rete di TIM non fa eccezione: in molte centrali sono presenti DSLAM a tecnologia IP che si affiancano e via via sostituiscono gli apparati ATM. Gli IP-DSLAM Ethernet, al contrario di quelli in tecnologia ATM, sono apparati che operano già in commutazione di pacchetto: estraggono il flusso dati dal traffico in arrivo dall'utente, lo frammentano in pacchetti e lo inviano secondo le specifiche della rete Internet. In questo senso, **gli IP-DSLAM Ethernet sono di fatto degli switch**, ossia apparati di indirizzamento e instradamento dei pacchetti verso i livelli più alti della rete.

Ai livelli di rete superiori, come già visto nel livello inferiore, esistono apparati che raccolgono e gestiscono i flussi di traffico in ATM e quelli che effettuano operazioni analoghe per i flussi Ethernet e IP.

Consideriamo prima il flusso ATM, che – una volta uscito dalla centrale – viene raccolto da reti locali organizzate su base geografica e collegate tra loro per evitare isolamento in caso di caduta del collegamento, e poi inoltrato verso un backbone ATM. In questo doppio passaggio, il sistema di gestione ha la piena visibilità di tutti gli apparati, evitando così congestioni di traffico sulla rete e garantendo una qualità di servizio costante. Il flusso ATM termina a un apparato denominato **Broadband Network Access Server o BNAS**, che – tra le altre funzioni – **rende leggibile il flusso ATM per il livello di rete superiore, la dorsale IP multiservizio**, che raccoglie tutti i flussi, indipendentemente dal protocollo di rete in cui sono codificati, e li tratta in logica IP. Un percorso analogo, ma veicolato attraverso altri apparati, è effettuato dai flussi IP.

In uscita dalla centrale, il flusso IP è raccolto dall'**Optical Packet Metro**, reti Ethernet che si sviluppano su un territorio metropolitano-regionale e che consentono un trasferimento dei dati a velocità che viaggiano nell'ordine dei Gigabit al secondo; per questo sono denominate anche **Gigabit Ethernet o GbE**. Gli apparati che effettuano l'aggregazione del traffico sono denominati feeder e alimentano gli apparati Metro. Su alcune aree di raccolta più complesse sono presenti due ulteriori livelli di raccolta: i remote feeder, apparati dedicati all'aggregazione del traffico periferico per la consegna del flusso ai feeder, e gli apparati Metro di Raccolta, che sicollocano invece sopra a quelli Metro e rappresentano la cerniera tra la rete Metro e il livello superiore rappresentato dalla dorsale IP multiservizio.

Tutto il percorso dei flussi, in qualunque formato siano essi codificati, è **controllato da un sistema di gestione** che vigila costantemente sui singoli apparati trasmissivi e sul funzionamento delle singole reti e sottoreti dell'intera infrastruttura. Nella gestione dell'infrastruttura rientrano in particolare la supervisione e il controllo delle performance di rete, per garantire che la consegna dei dati avvenga nelle modalità predefinite.

Tale aspetto è particolarmente delicato soprattutto nei flussi a commutazione di pacchetto, per i quali bisogna garantire che tutte le informazioni arrivino senza ritardi, errori o perdite di informazioni. Rientrano nell'ambito del sistema di gestione anche aspetti che riguardano non tanto l'effettivo completamento dell'attività di trasporto, quanto le modalità in cui questo avviene. Per esempio il BNAS, che opera come terminazione del flusso ATM, fornisce anche supporto per le funzioni di autenticazione, autorizzazione e tariffazione.

LA FIBRA OTTICA

Una modalità di connessione a banda larga è costituita dai collegamenti in fibra ottica, che operano secondo una modalità di trasporto differente rispetto all'ADSL: invece di trasferire segnali elettrici, inviano impulsi luminosi. Per un operatore di telecomunicazioni, optare per la fibra ottica - rispetto all'ADSL - significa effettuare una scelta di cambiamento radicale, dal momento che richiede una sostituzione – parziale o totale – della rete di distribuzione. Un investimento economico significativo che si traduce in una crescita significativa delle prestazioni, dal momento che **la fibra ottica permette velocità di un ordine di grandezza superiore** alle tecnologie del rame (dai 100 Mbit/sec ad 1 Gbit/sec).

Un'ulteriore caratteristica distintiva rispetto all'ADSL è rappresentata dalla **simmetria** della soluzione: la velocità in **upstream** è **identica** a quella in **downstream**. Le performance possono variare in base al punto in cui arriva la fibra ottica. Le soluzioni integralmente in fibra ottica (dall'abitazione dell'utente alla centrale, come nel caso della **FTTH** o Fiber to the Home) offrono velocità superiori rispetto alle soluzioni che utilizzano il rame per completare il collegamento dall'armadio di distribuzione all'abitazione (si parla in questocaso di **FTTB** o Fiber to the Building) o dall'armadio riparti-linea all'abitazione (**FTTCab** o Fiber to the Cabinet).

LA RETE NGAN

Per rete di accesso di nuova generazione (**NGAN = New Generation Access Network**) si indica una infrastruttura in grado di abilitare offerte e servizi che richiedono velocità di gran lunga superiori rispetto ai tradizionali accessi a larga banda attualmente in campo. Il rapido e continuo incremento della richiesta di banda per i nuovi servizi richiede una continua innovazione nella rete di accesso e un dispiegamento sempre maggiore della fibra ottica. In passato si riteneva che le velocità richieste dai nuovi servizi fossero possibili solo attraverso l'introduzione della fibra ottica nella rete di accesso, o in misura integrale (ossia fino all'abitazione del cliente) o quasi integrale (fino all'edificio).

Tuttavia l'evoluzione delle tecnologie trasmissive sulla rete di accesso tradizionale ha modificato lo scenario, permettendo di sfruttare le grandi potenzialità della rete secondaria, ed introducendo la fibra in rete di accesso gradualmente, tanto che oggi si parla di rete di nuova generazione – e più precisamente di rete di accesso di nuova generazione (**NGAN o Next Generation Access Network**) – anche per soluzioni che portano la fibra fino all'armadio riparti-linea per poi proseguire in rame fino all'abitazione (FTTCab). In altre parole, per la realizzazione della NGAN sono possibili diverse modalità tecniche tutte basate sull'utilizzo, più o meno esteso, della fibra ottica in rete di accesso. Le architetture di accesso fisso per la NGAN si differenziano tra loro essenzialmente in funzione di:

- modalità di connessione: punto-punto (P2P) o punto-multipunto (Gigabit Passive Optical Network GPON);
- punto di terminazione della fibra nella rete di distribuzione al cliente: in un cabinet stradale (FTTCab), presso o dentro un edificio (FTTB), in casa del cliente (FTTH).

Come si può facilmente intuire, una linea in fibra ottica dedicata per ogni singola abitazione (soluzione punto-punto o P2P) offre velocità superiori rispetto a soluzioni che prevedono che alcuni tratti del collegamento ottico siano condivisi tra più utenti (albero GPON o Gigabit Passive Optical Network). Tuttavia il P2P richiede un investimento più significativo rispetto al GPON e maggiori costi di gestione. In ogni caso, qualunque sia la soluzione scelta, non c'è dubbio che nel futuro le reti a banda ultra larga saranno sempre più ottiche.

Dal punto di vista generale, non esiste una soluzione ottimale; ogni Operatore sceglie la propria architettura in funzione della tipologia di aree da servire (metropolitana, periferica, rurale), della

densità abitativa, della tipologia della clientela, della disponibilità di infrastrutture ottiche o di canalizzazioni adatte all'uso, dell'impatto urbanistico. Naturalmente, questi aspetti sono coniugati con le strategie d'investimento ed il contesto competitivo. In particolare, il volume si focalizza maggiormente sulla soluzione FTTCab con tecnologia GPON, ovvero la soluzione maggiormente adottata da TIM per garantire una connessione in banda ultra-larga in tutto il paese.

Nella soluzione FTTCab la rete di distribuzione ottica ODN (Optical Distribution Network) termina in un Cabinet che necessita di alimentazione elettrica, posto sulla sommità dell'armadio ripartizione della rete in rame già esistente. Gli utenti sono collegati al Cabinet mediante il doppino in rame (rete secondaria) in tecnologia VDSL2, la quale permette di aumentare la velocità di connessione della rete secondaria in rame attraverso l'applicazione di innovazioni tecnologiche alla rete trasmissiva quali:

- DSM e Vectoring – intervengono sul rumore di diafonia (Cross-talk) ossia l'interferenza elettromagnetica che si può generare fra due cavi vicini in un circuito o in un apparato elettronico, con lo scopo di attutirlo o di eliminarlo completamente;
- Bonding – permette di aggregare più linee xDSL in un unico flusso logico di trasmissione (Ethernet o ATM), offrendo una banda equivalente pari alla somma dei singoli collegamenti DSL. Ciò permette di aumentare il bit rate offribile ad un utente, o la copertura di un servizio a parità di velocità, sfruttando la trasmissione su più coppie in rame;
- G.Fast – adatta a brevi distanze fra il doppino dell'utente e l'armadio di ripartizione, tale tecnologia permette di raggiungere sul singolo doppino velocità particolarmente elevate: oltre i 500 Mb/s e fino a 1 Gbit/s aggregato (upstream+downstream) per distanze inferiori ai 100 m ed almeno 200 Mbit/s a 200 m di distanza.

LA DORSALE IP MULTISERVIZIO PER IL TRASPORTO DEI DATI A LUNGA DISTANZA

I flussi di traffico e di informazioni, trasportati a livello locale e regionale delle infrastrutture di rete, hanno bisogno di una rete nazionale per poter essere portati da un punto all'altro del Paese, o per poter essere instradati verso reti internazionali o verso internet. Tale funzione è svolta dalla **dorsale IP multiservizio**. Il termine “multiservizio” sta ad indicare proprio la differenza tra tale infrastruttura e le altre che su di essa poggiano: mentre queste ultime sono infatti reti monoservizio, adibite cioè al trasporto di una **unica tipologia di traffico** (traffico vocale per la rete telefonica, traffico dati per la rete a banda larga, ecc.), la dorsale IP raccoglie qualunque tipo di flusso che – trasformato in pacchetto IP dagli apparati posti nei livelli intermedi della rete – viene trattato in modo indistinto. Dal punto di vista logico, la dorsale IP multiservizio è costituita da due livelli distinti:

- il livello più interno, che prende il nome di Core e che più spesso viene indicato come Optical Packet Backbone (o rete OPB);

- un livello più esterno che costituisce la corona di EDGE.

L'OPTICAL PACKET BACKBONE O RETE OPB

La rete **OPB** è la vera e propria **dorsale di trasporto nazionale** della rete TIM. È costituita da **32 nodi**, che prendono il nome di nodi OPB, e dai collegamenti che legano tali punti tra di loro. La rete **OPB nasce come una rete IP**, ma è abilitata anche per il trasporto di servizi con tecnica **MPLS** (MultiProtocol Label Switching). Questo protocollo permette, per esempio, la costruzione di reti private virtuali oltre ad altri tipi di servizi. Per questo la rete OPB è anche chiamata **dorsale trasmissiva IP/MPLS**.

I collegamenti tra i 32 nodi OPB disegnano uno schema a “doppio centro stella”. In genere, quando si fa riferimento a uno schema a stella per una rete, si vuole indicare che i nodi non sono direttamente collegati tra loro, ma che uno di essi occupa un posto centrale e a questo nodo è demandato il compito di mettere in collegamento gli altri nodi tra loro. La struttura del Backbone di TIM prevede due nodi centrali (Roma e Milano) da cui deriva la classificazione a “doppio centro stella”. In realtà il termine “doppio” indica anche un’ulteriore caratteristica: per assicurare affidabilità alla rete di trasporto, i due nodi centrali che svolgono la raccolta del traffico nazionale per tutti i nodi OPB sono duplicati, ossia le infrastrutture e gli apparati che assicurano lo smistamento del traffico sono presenti in due sedi di Roma e due sedi di Milano collegate tra di loro.

Le 4 centrali di Roma e Milano prendono il nome di **Inner Core**. Le altre centrali OPB fanno invece parte dello **Outer Core**, struttura che permette il funzionamento anche nel caso in cui uno dei due nodi del centro stella presentasse dei problemi. Attualmente, i nodi Inner core sono interconnessi con collegamenti multipli in fibra ottica a 10 Gigabit al secondo, così come i nodi Outer collegati ai nodi Inner core.

L’attività di gestione e smistamento del traffico viene effettuata da terarouter (router in grado di instradare a velocità dell’ordine delle migliaia di Gigabit al secondo) nei quattro **PoP** (Point of Presence) dell’Inner Core e da terarouter e/o gigarouter nelle altre sedi, a seconda dei volumi di traffico che gravano abitualmente sulle aree geografiche di riferimento. Recentemente la crescita del traffico e lo sviluppo di Router IP ad altissima capacità, elevata affidabilità e basso consumo energetico ha reso opportuno un aggiornamento della rete OPB. La nuova rete IP-MPLS, denominata NGCN (Next GenerationCore Network), è stata progettata come aggiornamento di OPB sia dal punto di vista dell’architettura di rete, sia riguardo alla capacità e scalabilità dei terarouter dell’inner core. NGCN consentirà di trasportare il traffico IP dei prossimi anni in modo sostenibile supportando i nuovi servizi e la crescita di quelli esistenti.

LA CORONA DI EDGE

La rete OPB è circondata da una corona denominata **EDGE**, che di fatto rappresenta la parte alta delle reti monoservizio e svolge una **funzione di cerniera** tra queste e la rete OPB. Fanno parte della corona EDGE gli apparati di raccolta dei servizi di accesso IP (per esempio, i BNAS

già descritti nel paragrafo dedicato alla banda larga), così come apparati terminali di altre reti che non sono qui descritti e che sovrintendono alla gestione e al trasporto del traffico di specifiche tipologie di clienti – come le grandi aziende, che dispongono di reti private virtuali – di particolari servizi (per esempio, le infrastrutture dedicate alla diffusione di contenuti multimediali via web, le cosiddette Content Delivery Network), o di piattaforme dedicate alla raccolta di alcuni tipi di traffico, come quello generato dagli utenti del servizio di accesso ad internet in dial-up, utilizzando cioè un modem ed una tradizionale linea telefonica.

LA RETE FOTONICA KALEIDON

A fine 2014 è stata completata la realizzazione della nuova piattaforma di trasporto nazionale di TIM: è “**Kaleidon**”, una rete completamente fotonica, ossia capace di trasportare segnali ottici ad alta capacità su lunga distanza senza costose conversioni ottico-elettriche. Essa è distribuita su **44 nodi**, è in grado di trasportare flussi a 40 Gigabit al secondo ed è predisposta per arrivare a **100 Gigabit al secondo**. La rete Kaleidon verrà tra breve affiancata dalla nuova rete “**Kaleidon Evolution**” la quale, grazie ad apparati dotati delle tecnologie fotoniche più recenti, sarà in grado di trasportare canali ottici fino a **500 Gigabit al secondo**.

L'avvento del **5G** rappresenta una trasformazione sostanziale della rete, che introduce prestazioni fino a 10 volte superiori a quelle del 4G, e che beneficia di driver di crescita come lo sviluppo di internet come rete globale, l'esigenza di digitalizzazione in tutti i settori dell'industria e dei servizi sia a livello privato sia nella pubblica amministrazione, e l'incremento esponenziale del traffico dati.

Il 5G non può essere considerato solo come la naturale evoluzione della tecnologia 4G: il 5G rappresenta infatti come un nuovo “ecosistema” delle telecomunicazioni, presentandosi allo stesso tempo come una “evoluzione” ed una “rivoluzione” nel mondo delle telecomunicazioni mobili. Il 5G infatti non sarà a sostituzione dei sistemi preesistenti, primo fra tutti l’LTE che continuerà la sua evoluzione nell’ambito del 5G, ma, oltre a una nuova tecnologia radio in grado di operare efficacemente a frequenze molto elevate (le cosiddette onde millimetriche) in specifici scenari che richiedono una banda trasmissiva estremamente elevata, introdurrà nuovi paradigmi di comunicazione e dovrà procedere di pari passo con l'evoluzione di altri fattori, quali l'evoluzione della banda ultralarga fissa, l'integrazione della stessa con quella mobile, prestazioni hardware e software sempre maggiori, e lo sviluppo di terminali sempre più potenti.

Sarà un sistema che comporterà una significativa trasformazione delle aree di business (Industry 4.0, Veicoli a guida Autonoma, Internet of Things, Metering e Smart City) che saranno direttamente coinvolte nella definizione e nello sviluppo. Una volta a regime, il 5G non solo rispetterà maggiormente gli standard tradizionali della rete mobile:

- **Velocità** di trasmissione: fino a 10 volte le performance LTE in termini di gigabit per secondo;

- **Latenza:** diminuzione fino a pochi millisecondi (un decimo rispetto alla LTE);
- **Affidabilità:** connessioni affidabili al 99,999% per servizi “mission critical” (public safety, e-Health, ecc.); ma potrà soddisfare esigenze fondamentali per i nuovi standard di telecomunicazione, quali:
- **Densità di servizio:** fino a un milione di terminali connessi per chilometro quadrato (10 volte superiori all’LTE) per una massiccia diffusione di sensori e/o attuatori;
- **Riduzione dei consumi:** sia per gli apparati di rete sia per i terminali;
- **Supporto** ad applicazioni **IoT** diversificate per modelli di utilizzo (robotica, sanità, ambiente, ecc.);

L’architettura del 5G parte dallo sviluppo evolutivo dell’LTE e dalla definizione di una nuova interfaccia radio (“New Radio” NR) che operano in modo complementare. L’altra caratteristica del **5G** è la **virtualizzazione della rete core e di quella di accesso mobile**, che saranno realizzate secondo un approccio “Virtual” (software anziché hardware), e saranno programmabili da remoto, con una gestione automatizzata delle capability di rete, delle applicazioni e dei servizi, ma anche per le attività di provisioning, administration e maintenance, per la riduzione delle complessità dell’infrastruttura, dei costi di operation e del “time to market” dei servizi.

Per realizzare ciò, sarà essenziale che le reti di trasporto ottica e IP debbano evolvere di pari passo, integrandosi all’interno di un framework unico di gestione e configurazione, in modo da associare le capability della rete in fibra (banda, consumo di energia, gestione) con i requisiti sempre più stringenti del nuovo accesso radio (capacità, latenza, affidabilità, densità di servizio, consumi, supporto IoT).

Il 5G Action Plan della Commissione Europea ha fissato l’inizio del lancio commerciale a partire dal 2020, in almeno una grande città per Stato Membro, oltre ad avere incluso nell’Agenda Digitale Europea obiettivi di sviluppo al 2025 nelle aree urbane e nei “corridoi di trasporto” (strade, rotaie, ecc). In tale contesto, TIM ha già iniziato i “trial” in alcune città per lo sviluppo di servizi e applicazioni 5G con lo scopo di arricchire il cosiddetto “ecosistema” digitale dei comuni interessati.

Conclusioni

Questa parte conclude la rassegna delle **reti TLC "fisse"** inclusa quella televisiva, che però è stata descritta solo nei suoi aspetti tecnologici, escludendo quelli realizzativi - ossia l’organizzazione sul territorio dei radiotrasmettitori con relative antenne. Restano da esaminare le **reti radiomobili** di uso civile, in particolare il 5G, e le trasmissioni radio digitali DAB (Digital Audio Broadcasting), oggi **DAB+**. Il tutto sarà oggetto di trattazioni successive.

Estratto da "<https://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Clavicordo:tlc-bignami-7a-parte>"