

## Digitale Terrestre

L'enorme progresso della tecnologia digitale ha portato alla integrazione delle metodologie informatiche con quelle delle telecomunicazioni al fine di definire una nuova piattaforma per la trasmissione dei canali televisivi. In questo modo l'apparecchio televisivo aggiunge alla tradizionale ricezione TV un insieme molto ampio di servizi interattivi. La TV digitale terrestre nasce dal progetto europeo DVB (Digital Video Broadcasting) che ha il compito di definire le specifiche tecniche che vengono successivamente ratificate dall'ETSI. In particolare sono stati definiti i sistemi:

- DVB-S: diffusione dei segnali numerici TV da satellitare
- DVB-C: diffusione dei segnali numerici TV via cavo
- DVB-T: diffusione dei segnali numerici TV terrestri

Per poter usufruire del digitale terrestre è sufficiente disporre di un decoder digitale, denominato STB *Set-Top Box*, a cui da una parte andrà collegato il normale cavo d'antenna TV e dall'altra un cavo SCART per il collegamento al televisore.

I ricevitori STB, noti anche con il nome di IRD (*Integrated Receiver Decoder*), sono dispositivi costituiti da apparati elettronici complessi governati da un sistema a microprocessore che gestisce tutte le operazioni di demodulazione e decodifica del segnale numerico e i servizi per l'interfaccia all'utente. Il software di gestione può essere aggiornato in remoto per aggiungere nuove funzionalità.

L'STB automaticamente ricerca e sintonizza i canali digitali. Se le frequenze riservate alla TV digitale non sono tra quelle disponibili sul proprio impianto d'antenna sarà necessario rivedere l'impianto e installare i filtri di banda necessari per una corretta ricezione. Negli impianti televisivi più vecchi potrebbe essere necessario il cablaggio di nuovi cavi, connettori, partitori, ecc. Tutto ciò si rende necessario perché, per una corretta ricezione, il rapporto segnale/rumore all'ingresso del ricevitore non deve essere inferiore a 20 dB.

Il digitale terrestre offre numerosi vantaggi all'utenza televisiva. Il segnale numerico è sicuramente meno influenzato dai disturbi e consente l'uso di potenti algoritmi di elaborazione che liberano il segnale da interferenze varie fornendo immagini di alta qualità. Altro motivo è che la tecnica digitale permette di sfruttare a pieno le bande di frequenza assegnate per la trasmissione TV.

La TV digitale utilizza un sistema di compressione dei dati numerici, noto come **MPEG-2**, in grado di allocare, in una banda VHF o UHF di una trasmissione analogica, fino a sei canali digitali contemporaneamente. Per ottimizzare la qualità della trasmissione si comprimono maggiormente i canali a basso contenuto multimediale, come ad esempio i notiziari, e meno quelli dedicati all'intrattenimento come film e spettacoli di varietà.

Con le tecniche digitali anche la qualità del suono diviene Hi-Fi. Lo standard DVB-T prevede trasmissioni stereofoniche in formato Dolby Digital.

La grande innovazione del digitale terrestre risiede nella elevata interattività per l'utenza che può avere accesso a una vasta gamma di servizi. Tale caratteristica è nota come piattaforma **MHP Multimedia Home Platform**. Per poter usufruire della piattaforma MHP si deve collegare il ricevitore STB, che dispone di un modem interno, al gestore dei servizi tramite la normale linea telefonica. Utilizzando il telecomando si può interagire con i programmi TV come quiz, televoto, televendite, TG interattivi, ecc. La piattaforma MHP consente l'uso del Super Teletext ovvero di un televideo

strutturato a pagine Web per la navigazione nei vari contenuti multimediali informativi come previsioni del tempo a livello globale o regionale, informazioni sul traffico, ecc.

## 9.1. Compressione MPEG

Per trasmettere un canale televisivo in formato numerico è necessario che i segnali video e audio siano digitali, cioè generati da telecamere digitali, altrimenti è necessaria, preliminarmente, una conversione analogico/digitale. Il segnale audio/video digitale non compresso è costituito da un flusso di dati con bit rate elevato, dell'ordine di 270Mbps, che occuperebbe una banda superiore a quella di un normale canale TV analogico. Per poter trasmettere un numero elevato di canali digitali è necessaria una opportuna codifica e compressione dei dati che non degradi, però, la qualità dell'informazione.

La tecnica di compressione impiegata si basa sullo standard MPEG2 (Motion Picture Expert Group) in grado di comprimere uno stream di dati da 200 Mbps fino a 5 Mbps.

L'MPEG è nato nel 1988 come un gruppo di lavoro dell'ISO/IEC (International Organization for Standardization /International Electrotechnical Commission) con l'obiettivo di definire uno standard di compressione dei segnali digitali audio/video. L'MPEG è un formato di compressione a perdita di informazione. Il segnale compresso è diverso da quello originario ma accettabile sotto il profilo della qualità poiché è costruito tenendo conto dei limiti percettivi audio/video dell'uomo.

Il dispositivo hardware e software che in trasmissione opera la compressione MPEG è detto **encoder**, mentre quello che, in ricezione, svolge la funzione opposta è detto **decoder**.

È noto che una immagine televisiva analogica è ottenuta come scansione dall'alto verso il basso e da sinistra verso destra. In particolare una scansione completa è formata da 625 linee ripetute 25 volte al secondo. In realtà il quadro televisivo è ottenuto interlacciando due immagini (semiquadri) ricavate dalla scansione delle righe dispari e pari. In altre parole si ispezionano prima  $625/2 = 312.5$  righe dispari e poi altrettante righe pari. L'insieme delle due trame interlacciate, ripetute 50 volte al secondo, ricostruisce il quadro completo dell'immagine.

Delle 625 linee 576 portano informazioni relative alla luminosità dell'immagine (luminanza) e al colore (crominanza) le altre 49 servono per gestire i sincronismi di trama. Per digitalizzare una immagine si suppone di dividere ciascuna riga in 720 punti detti *pixel*. In tal modo un'immagine TV digitalizzata è costituita da  $720 \cdot 576 = 414720$  pixel ad ognuno dei quali sono associati i valori di luminanza Y e la crominanza C. È stato dimostrato che la sensazione cromatica di una immagine può essere riprodotta sommando, in rapporti diversi, tre colori fondamentali: il rosso (Red), il Verde (Green) e il Blu (Blue). Tale combinazione si indica sinteticamente con RGB. Ciò comporterebbe che ad ogni pixel siano associati quattro segnali: uno per la luminanza e tre per il colore. Il segnale di luminanza da solo contiene tutte le informazioni relative all'immagine in bianco e nero.

In una trasmissione a colori il segnale di luminanza Y è ottenuto dalla somma delle diverse componenti di colore  $Y = R + G + B$ . Ciò suggerisce la possibilità di trasmettere due soli segnali di colore ottenuti dalla combinazione degli altri.

Infatti, le specifiche di trasmissione del segnale TV digitale impongono che il segnale video a colori sia costituito dai dati ottenuti dal campionamento di tre componenti: la componente relativa alla luminanza Y e due componenti  $C_r$  e  $C_b$  relative al colore. Si pone:

$$C_r = R - Y \quad \text{e} \quad C_b = B - Y$$

L'insieme dei due segnali Cr e Cb, ottenuti come differenza tra i colori rosso e blu e il segnale di luminanza, è noto con il nome di *segnale di crominanza*. È facile verificare che, noti i valori di Y, Cr e Cb, si possono ricavare le componenti RGB del colore. Infatti:

$$R = Y + Cr; \quad B = Y + Cb; \quad G = Y - (R + B)$$

Ogni pixel è, pertanto, completamente descritto dalla conoscenza di tre valori uno per la luminanza e due per la crominanza. Associando a ciascuno di essi 1 byte si ricava che sono necessari 3 byte per pixel. Un quadro completo richiede quindi un numero di byte pari a:

$$720 \cdot 576 \cdot 3 = 1.224.160 \text{ byte}$$

Poiché vengono trasmessi 25 fps (frame al secondo) si ricava che la velocità di trasmissione vale:

$$720 \cdot 576 \cdot 3 \cdot 25 \cdot 8 = 237.3 \text{ Mbps}$$

come indicato all'inizio del paragrafo.

Per comprimere questa mole di dati MPEG 2 sfrutta le seguenti considerazioni:

- **Percezione Visiva.** La percezione visiva è più sensibile al valore della luminanza piuttosto che a quello della crominanza per cui si possono associare meno bit informativi per descrivere il livello di colore.
- **Ridondanza Spaziale.** Pixel vicini nello stesso frame hanno, con molta probabilità, colori simili.
- **Ridondanza Temporale.** Se un pixel in un frame ha un certo colore è molto probabile che quelli del frame precedente o successivo hanno colori simili, salvo nei cambi di scena.

Per comprendere come la ridondanza spaziale produca una compressione dei dati consideriamo 4 pixel vicini come mostrato nella seguente fig. 32.

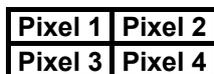


Fig. 32. - Distribuzione di quattro pixel.

Per descrivere la luminosità e i colori dei 4 pixel sono necessari, senza compressione, 12 byte. La successione dei campioni segue particolari strutture (MP@ML Main Profile Main Level) ) denominati *profili di codifica*. In assenza di compressione il profilo di codifica è indicato come: **4:4:4**. Cioè, dei 12 byte 4 sono di luminanza, 4 per la componente di colore Cr e 4 per la componente Cb. Si hanno i seguenti gruppi di byte mostrati in fig. 33.

Pixel 1 $Y_1 C_{r1} C_{b1}$	Pixel 2 $Y_2 C_{r2} C_{b2}$
Pixel 3 $Y_3 C_{r3} C_{b3}$	Pixel 4 $Y_4 C_{r4} C_{b4}$

Fig. 33. - Distribuzione di quattro pixel con indicati i valori di luminanza e cromaticità.

Per realizzare la compressione dei dati si impiegano diversi profili di codifica. Nel caso del digitale terrestre sono utilizzati i profili 4:2:2 e 4:2:0.

Nella **4:2:2**, nota anche come ITU-R 601, ciascun pixel ha il suo valore di luminanza  $Y$ , mentre ai pixel 1 e 2 si attribuisce come cromaticità,  $C_{r12}$  ( $C_{b12}$ ), lo stesso valore attenuato come media dei valori di cromaticità.. Analogo ragionamento per i pixel 3 e 4. In formule si ha:

$$C_{r12} = \frac{C_{r1} + C_{r2}}{2}; \quad C_{b12} = \frac{C_{b1} + C_{b2}}{2};$$

$$C_{r34} = \frac{C_{r3} + C_{r4}}{2}; \quad C_{b34} = \frac{C_{b3} + C_{b4}}{2}$$

Utilizzando questa compressione per descrivere 4 pixel sono sufficienti 8 byte: 4 di luminanza e 4 di cromaticità, invece dei 12 di un formato non compresso. In altre parole si può dire che, in media, un pixel è descritto da 2 byte. Pertanto un quadro completo richiede:

$$720 \cdot 576 \cdot 2 = 829.440 \text{ byte}$$

Si è ottenuta una riduzione del 33% del numero di byte per quadro.

Un altro profilo di codifica utilizzato nell'MPEG2 è il **4:2:0**. In questo formato 4 pixel adiacenti sono descritti da soli 6 byte. Ciascun pixel ha il suo valore di luminanza mentre il valore di cromaticità è unico per i 4 pixel ed è ottenuto dalla media dei valori. In formule:

$$C_{r1234} = \frac{C_{r1} + C_{r2} + C_{r3} + C_{r4}}{4}; \quad C_{b1234} = \frac{C_{b1} + C_{b2} + C_{b3} + C_{b4}}{4}$$

È facile verificare che in questo caso si ha una compressione del 50%. La perdita di qualità è irrisoria e solo ingrandendo l'immagine è possibile accorgersi della carenza di colore.

La compressione temporale richiede algoritmi più complessi. L'MPEG suddivide i fotogrammi in tre tipi:

- **I-Frame** (Intra Frame). Sono codificati dall'encoder e decodificati dal decoder in modo indipendente dai fotogrammi precedenti e successivi. Per essi si ha solo compressione spaziale.
- **P-Frame** (Predictive Frame). È un fotogramma ottenuto come differenza tra I Frame o P frame precedenti.

- **B-Frame** (Bidirectional-Predictive Frame). È un fotogramma ottenuto come differenza immagini I/P precedenti e successive.

I frame P e B sfruttano a pieno la ridondanza temporale poiché è molto probabile che fotogrammi vicini hanno livelli di luminanza e crominanza quasi uguali per cui la differenza tra i fotogrammi genera immagini a basso contenuto informativo e quindi con elevata possibilità di compressione. Nei cambi repentini di scena non è possibile inserire frame P o B pena un degrado della qualità del filmato. In questa situazione l'encoder provvede a inserire frame I.

Questi frame subiscono una ulteriore compressione, utilizzando raffinati algoritmi numerici e vengono trasmessi in opportune sequenze. L'insieme di tali sequenze è detta GOP (Group of Pictures). Una sequenza molto efficiente per la compressione si riferisce alla trasmissione continua di 12 quadri ed è strutturata nella seguente trama: IBBPBBPBBPBB.

Gli algoritmi di compressione temporale si basano su tecniche complesse come la DCT (Discrete Cosine Transform) e l'uso di *matrici di quantizzazione* per il cui approfondimento si rimanda a testi specializzati. In fig. 34 si mostra la scheda del codificatore MPEG2 prodotta dalla ABE Elettronica ([www.abe.it](http://www.abe.it))

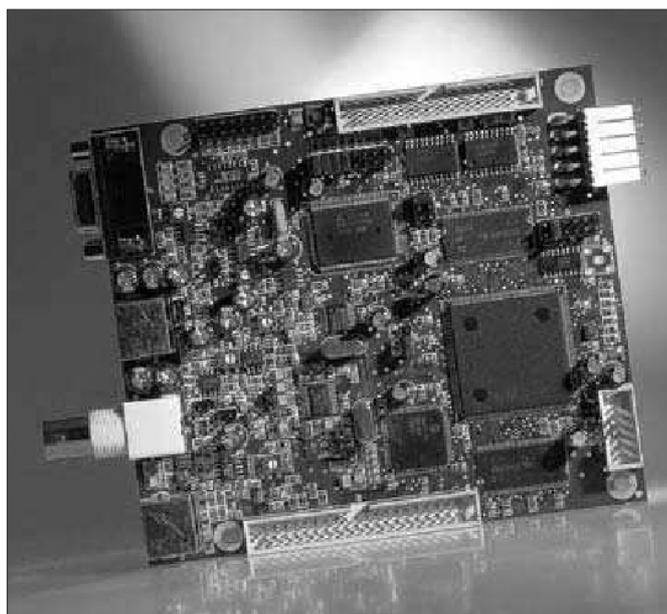


Fig. 34. – Codificatore MPEG2 della ABE Elettronica.

## 9.2. Modulazione e codifica di canale

Il segnale televisivo, codificato con compressione MPEG2, per essere trasmesso via etere all'utente deve essere modulato utilizzando un sistema che consente la trasmissione di più canali entro la stessa banda di frequenza VHF o UHF. La modulazione impiegata nel DVB-T è la **COFDM** (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing). La modulazione COFDM, nota anche come OFDM, si basa sul seguente principio. Il canale di diffusione TV su cui si intende trasmettere viene suddiviso in un numero elevato di portanti radio equispaziate. Il termine *ortogonale* deriva dal fatto che ogni portante è sfasata di 90° rispetto a quella adiacente. Il flusso

numerico di dati è distribuito sulle portanti con modulazione digitale del tipo QPSK o M-QAM. Ricordiamo che nella QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) si ha una modulazione di fase con quattro posizioni nella costellazione per cui un simbolo è rappresentato da 2 bit. Nella M-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) si ha una modulazione di ampiezza e fase che per il DVB-T è, tipicamente, con 16 (16-QAM con 4 bit per simbolo) o 64 (64-QAM con 6 bit per simbolo) posizioni nella costellazione. In fig. 35 si mostra la costellazione dei simboli per la 16-QAM.

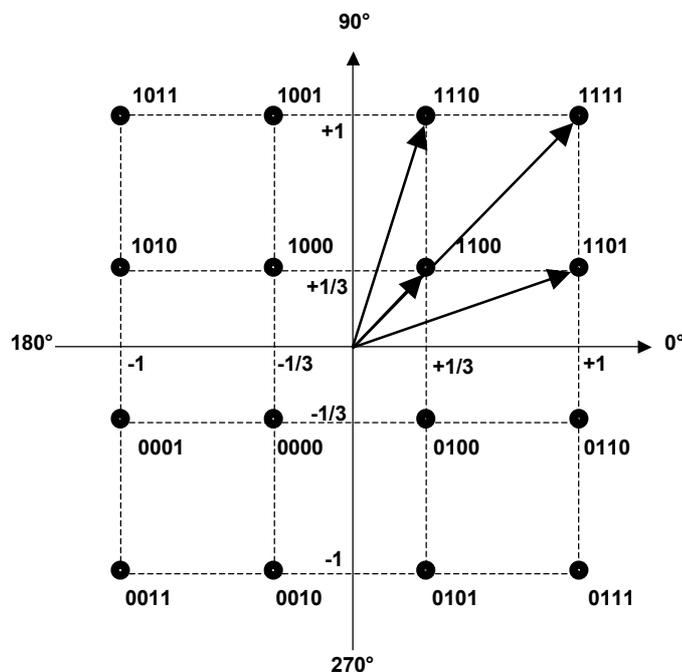


Fig. 35. – Costellazione per la modulazione 16QAM.

Si definisce *Symbol Rate* il numero di posizioni al secondo che la portante può assumere nella costellazione.

Una importante caratteristica della modulazione digitale COFDM risiede nella possibilità che più trasmettitori inviino gli stessi programmi in zone territoriali adiacenti utilizzando le stesse frequenze senza che ci sia interferenza. Tale caratteristica deriva dalla mutua ortogonalità delle portanti radio della COFDM. La rete, in tal caso, è detta **SFN Single Frequency Network** e può essere a copertura regionale o nazionale.

Nelle trasmissioni analogiche ciò non è possibile a causa delle interferenze che si avrebbero trasmettendo gli stessi canali in una stessa zona con conseguente degrado della qualità del segnale.

Per avere una rete SFN è necessario impiegare trasmettitori sincronizzati operanti sullo stesso canale a radiofrequenza. Ciò si realizza mediante il sistema GPS (Global Position System).

I satelliti GPS trasmettono segnali ricevibili in tutto il mondo con una precisione in frequenza praticamente assoluta. I trasmettitori della rete SFN si agganciano al sistema GPS per sincronizzare i propri apparati.

Si definisce *Transport Stream* il flusso dei dati relativo al programma TV (o ai programmi) che devono essere inviati all'utenza. Diversi *Transport Stream* possono essere *multiplati* per formare un unico flusso numerico.

In fig. 36 si mostra uno schema a blocchi semplificato di un trasmettitore DVB-T

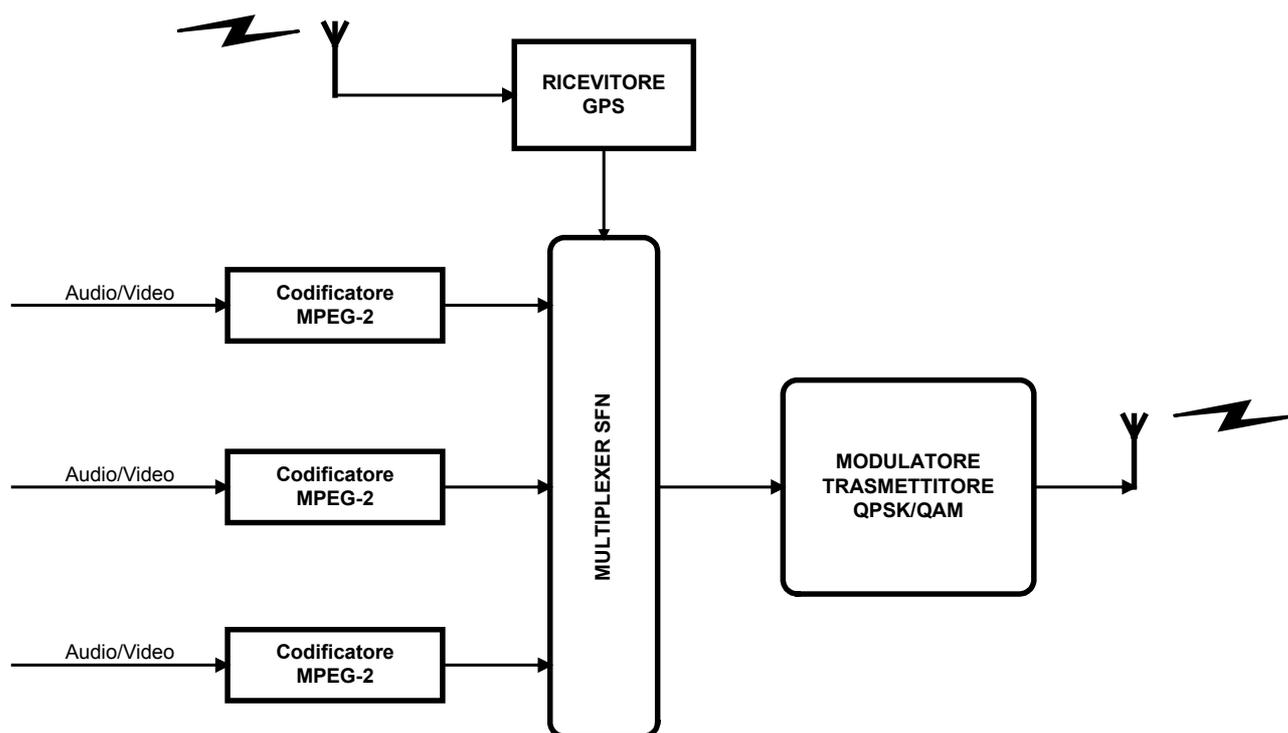


Fig 36. – Schema a blocchi di un trasmettitore DVB-T.

La modulazione COFDM è realizzata mediante l'algoritmo IFFT (Inverse Fast Fourier Trasform) e opera con due modalità indicate con 2K e 8K.

In tabella 8 si riportano i valori dei parametri caratteristici del sistema DVB-T.

Tabella 8

Parametro	Modalità 2K				Modalità 8K			
Portanti attive	1705				6817			
Portanti dati	1512				6048			
Durata del simbolo $T_u$	224 $\mu$ s				896 $\mu$ s			
Spaziatura tra portanti $1/T_u$	4464 Hz				1116			
$\Delta = T_g/T_u$	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Intervallo di guardia $T_g$	56 $\mu$ s	28 $\mu$ s	14 $\mu$ s	7 $\mu$ s	244 $\mu$ s	112 $\mu$ s	56 $\mu$ s	28 $\mu$ s

Nella modalità 2K la banda video è suddivisa in 1705 portanti attive di cui 1512 trasportano dati veri del segnale audio/video, mentre le altre sono impiegate per il sincronismo di trama, la valutazione della modalità di trasmissione e del canale impiegato, ecc. La larghezza di banda risulta di 7.61 MHz ( $1705 \cdot 4464 = 7.61$  MHz).

Per eliminare gli effetti di eco del segnale radio ed evitare interferenze intersimboliche con trasmettitori vicini, dopo la trasmissione di un simbolo viene lasciato un *intervallo di guardia* durante il quale il trasmettitore non emette alcun segnale. L'intervallo di guardia è scelto come frazione della durata del simbolo.

Maggiore è l'intervallo di guardia maggiore è la distanza entro cui sono tollerati i fenomeni di eco ed interferenza.

Ad esempio, nella modalità 8K con un intervallo di guardia di 244  $\mu$ s, ed assumendo una velocità di propagazione pari a quella della luce, si ha:

$$d = 244 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^8 = 67.2 \text{ Km}$$

In fig. 37 si mostra la scheda del modulatore QPSK/QAM prodotta dalla ABE elettronica

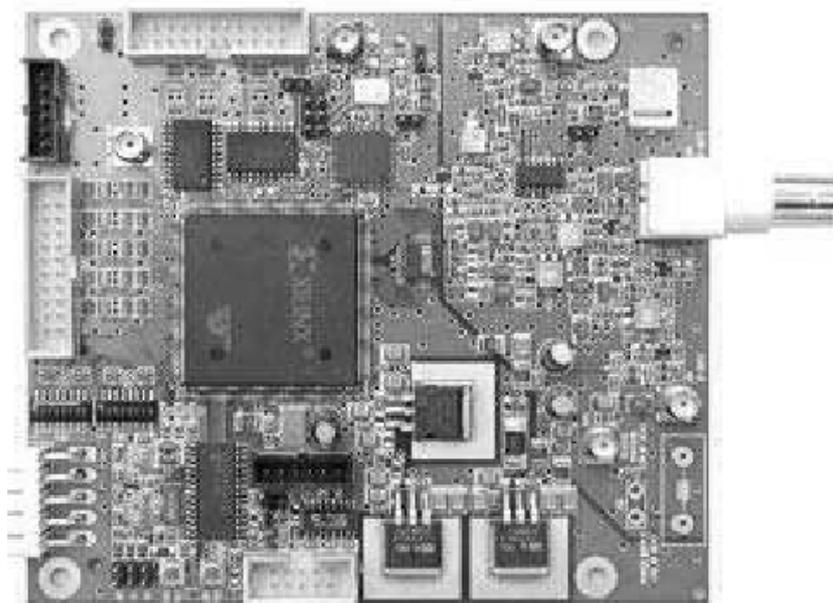


Fig. 37. - Modulatore QPSK/QAM della ABE Elettronica.

I trasmettitori digitali devono inviare, insieme al flusso numerico informativo, anche un insieme di *bit di controllo* che il ricevitore decodifica per individuare e correggere eventuali errori di trasmissione.

Maggiore è il numero di bit di controllo migliore sarà la qualità della trasmissione a scapito, ovviamente, della quantità di dati trasmessi nell'unità di tempo e quindi del numero di canali digitali per banda occupata.

Nella DVB-T il sistema di correzione degli errori FEC (Forward Error Correction) utilizza principalmente la codifica **Reed Solomon**. Il segnale digitale del Transport Stream è organizzato in trame di 204 byte di cui 188 informativi e 16 per la codifica Reed Solomon in grado di correggere fino a 8 errori per trama. Per aumentare la capacità di correzione oltre al Reed Solomon si utilizza il sistema **Inner Coder** che consiste nell'inserire nella trama ulteriori bit per la gestione degli errori.

Tipici valori sono: Inner Coder 7/8 che inserisce 1 bit di controllo ogni 7 bit di dati utili e il potente Inner Coder 1/2 che inserisce 1 bit di controllo per ogni bit di dati.

Il ricevitore digitale estrae i dati di controllo dal flusso numerico in ricezione e applica gli algoritmi relativi per effettuare le correzioni

Il ricevitore digitale deve compiere delle operazioni inverse a quelle effettuate nella trasmissione. In primo luogo viene rimosso l'intervallo di guardia e applicata la FFT (Fast Fourier Transform) per ricostruire il segnale COFDM. Successivamente le diverse portanti vengono equalizzate in ampiezza e fase e demodulate al fine di estrarre sia i bit relativi al segnale audio/video che quelli per la correzione degli errori.

Per concludere si riportano i dati tecnici di un tipico DVB-T commerciale:

- Completamente azionabile e programmabile tramite telecomando
- Decodifica video MPEG2
- Formato video 4:3 e 16:9
- Risoluzione fino a 720x576 pixel
- Decodifica audio MPEG layer I/II
- Istantanea automatica dei canali
- Aggiornamento automatico della lista dei canali
- Modalità TV e radio
- Blocco canali limite di età con PIN
- Timer videoregistratore
- Compatibilità con i servizi MHP
- Aggiornamento del software tramite scaricamento in linea
- Modulazione COFDM (QPSK, 16-QAM, 64-QAM)
- Gamma di frequenze:  
VHF III: 174 MHz – 231 MHz;      UHF IV/V: 470 MHz – 862 MHz
- Clock processore 180 MHz
- SRAM-CPU/Video Graphics: 40 Mbyte
- Flash Memory: 8 Mbyte
- Lettore Smart Card
- Interfaccia seriale D-9 femmina
- Conforme allo standard DVB-T ETS 300 744