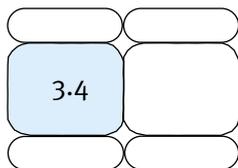




SEGNALI TELEVISIVI DIGITALI: STANDARD DI CODIFICA E TRASMISSIONE

Alberto Morello
Vittoria Mignone
Paola Sunna



La diffusione di programmi televisivi all'utente finale avviene tramite l'utilizzo di diversi sistemi diffusivi (satellite, cavo, digitale terrestre ecc.). I sistemi diffusivi si basano sul compromesso di garantire un'elevata qualità di servizio, utilizzando *bit-rate* e potenze limitate. Le tecniche per la riduzione del *bit-rate* sono identificate come la *codifica di sorgente* e la *codifica di canale*. Questo articolo presenta una rassegna degli standard di codifica e trasmissione consolidati e introduce le più recenti novità del settore.

1. PREMESSA

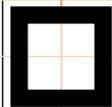
La digitalizzazione del segnale televisivo e la disponibilità di nuovi mezzi trasmissivi ha creato, rispetto al passato, un'estesa gamma di servizi per la diffusione di programmi televisivi all'utente finale; in particolare tra i sistemi diffusivi oggi disponibili vale la pena di ricordare quelli via satellite, via cavo (con scarso interesse per l'Italia ma usati in molti altri Paesi), i recenti sistemi di *broadcasting* terrestre e i più recenti sistemi in ADSL e fibra che si appoggiano sul protocollo IP, ma che non sono stati finora completamente standardizzati. L'ottimizzazione di un sistema diffusivo si basa essenzialmente sul compromesso di garantire un'elevata qualità di servizio (bassa probabilità di errore sul segnale al ricevitore) pur utilizzando *bit-rate* e potenze limitate. Nella teoria delle comunicazioni le tecniche per la riduzione del *bit-rate* sono identificate come *codifica di sorgente*: il loro scopo è eliminare nel modo più efficiente possibile tutte le ridondanze presenti nel segnale audio-video originale, in particolare le *ridondanze spaziali* a livello di singolo quadro e le *ridondanze temporali* tra qua-

dri successivi di una sequenza televisiva. Per questa ragione gli *standard di codifica* basati sull'eliminazione della ridondanza del segnale originario vengono spesso denominati *standard di compressione*.

L'ottimizzazione del sistema trasmissivo propriamente detto si basa, invece, sulla scelta di un'opportuna *codifica di canale* (con codici correttori di errori che aumentano leggermente la ridondanza per ridurre drasticamente la probabilità di errore) e del *sistema di modulazione* più appropriato alle caratteristiche di propagazione del mezzo trasmissivo.

Gli studi condotti nell'ambito della codifica di canale e di sorgente hanno originato e continuano a dar vita a *standard* caratterizzati da prestazioni sempre migliori che non sempre però sono adottati a livello universale e tanto meno garantiscono la compatibilità con terminali di utente già esistenti.

Va sottolineato che, nella pratica corrente, s'identifica col *nome di standard di codifica* tutta la famiglia degli standard di codifica di sorgente e con il nome di *standard di trasmissione* la famiglia degli standard per i di-



versi mezzi trasmissivi (e le loro evoluzioni) con riferimento alle scelte effettuate sui sistemi di modulazione e di codifica di canale. Il presente articolo, oltre ad un richiamo storico e ad una rassegna dei più importanti standard ormai consolidati nei due campi sopra accennati, introduce le più recenti novità nell'ambito degli standard di codifica e degli standard di trasmissione.

Per i sistemi di codifica si fa riferimento essenzialmente a quelli studiati dall'Organismo di standardizzazione MPEG (*Motion Picture Expert Group*) che sono riusciti ad ottenere un consenso a carattere universale sia per quanto riguarda diversi settori merceologici (informatica, telecomunicazioni, broadcasting e consumer) sia a livello di copertura geografica.

Per i sistemi trasmissivi si considerano quelli studiati in ambito dell'organismo DVB (*Digital Video Broadcasting*) che, pur avendo caratteristiche essenzialmente europee, è riuscito a diffondere i propri standard in tutto il mondo (esiste, infatti, un analogo organismo anche negli Stati Uniti).

2. LA STORIA DEGLI STANDARD DI CODIFICA E TRASMISSIONE

Per comprendere gli sviluppi attuali della televisione digitale, è utile ripercorrere brevemente la storia, dagli esordi ad oggi, dei cambiamenti conseguenti alla digitalizzazione. All'inizio degli anni '80 sembrava che l'evoluzione tecnologica del sistema radiotelevisivo negli Stati Uniti, in Europa e Giappone dovesse avviarsi verso un modello che privilegiava il miglioramento qualitativo dell'immagine, in termini di definizione e di resa cromatica. Notevoli investimenti venivano effettuati già da qualche anno in Europa e Giappone nella direzione dell'EDTV (*Enhanced Definition TV*); il Giappone, inoltre, da circa un decennio aveva impegnato enormi risorse nello sviluppo della TV ad alta definizione HDTV (*High Definition TV*) che sembrava lo strumento ideale per offrire all'utente la sensazione di partecipare all'evento (*effetto presenza*) combinando una visione perfetta su uno schermo panoramico con l'audio stereofonico surround. Gli Stati Uniti, dal canto loro, avevano intravisto nel lancio dell'HDTV una favorevole occasione per rivitalizzare l'industria nazionale

dell'elettronica di consumo, mentre l'Europa, rimasta pressoché assente dal comparto dell'informatica, non intendeva lasciarsi sfuggire di mano anche quello della televisione. Le soluzioni *full digital* erano allora ai primi passi, con la standardizzazione dei formati video di studio (è degli anni '80 la raccomandazione ITU-R BT.601) e dei sistemi di codifica video di tipo PCM, richiedenti velocità di trasmissione molto elevate (dell'ordine di 200 Mbit/s) anche per segnali a definizione convenzionale.

La diffusione digitale all'utente sembrava ancora un'utopia e le proposte, al cui sviluppo lavorava l'industria - MUSE (*MUltiple Sub-sampling Encoding*) in Giappone, MAC (*Media Access Control*) e HDMAC (*High Definition MAC*) in Europa - erano, di fatto, sistemi analogici assistiti da flussi di informazione digitale (fra cui l'audio con qualità CD).

La svolta radicale si ebbe nel 1990 (dopo tre anni di studi e sperimentazioni) quando un consorzio formato da RAI, Telettra, RTVE (l'allora Ente Pubblico radiotelevisivo spagnolo) e Politecnico di Madrid nell'ambito del progetto europeo EUREKA 256 dimostrò la fattibilità di un sistema di trasmissione interamente digitale di TV ad alta definizione, durante i campionati mondiali di calcio in Italia del 1990. Oltre 16 partite (tre da Milano, quattro da Napoli, due da Torino, una da Firenze, una da Bari e le restanti da Roma, compresa la finale) furono trasmesse in diretta, attraverso il satellite sperimentale italiano Olympus, in salette appositamente attrezzate presso le sedi RAI, con circa 800 spettatori ciascuna, ottenendo un grande consenso dal pubblico presente. Fu possibile anche collegarsi con Barcellona, limite di copertura del satellite, e trasmettere via fibra ottica il segnale dei campionati del mondo fino a Madrid dove era stata allestita una sala apposita. In contemporanea il sistema fu portato negli Stati Uniti in concorrenza ad un sistema presentato dalla NEC, riscotendo un notevole interesse.

Il rivoluzionario sistema ("siamo riusciti a far passare un cammello dalla cruna di un ago...!"), disse allora il Direttore Generale della Telettra nella conferenza stampa di presentazione) era basato sull'utilizzo della trasformata matematica DCT (*Discrete Cosine Transform*) che avrebbe costituito, quattro anni più tardi, la base essenziale dello standard MPEG-2, accettato an-

che dagli Stati Uniti [1]. Il sistema studiato permetteva di trasmettere i segnali HDTV sulla stessa banda satellitare (70 Mbit/s ridotti l'anno dopo a 34 Mbit/s) richiesta dai sistemi analogici MUSE e HDMAC, ma offriva una qualità video di gran lunga superiore. Inoltre, a parità di risoluzione dell'immagine, permetteva di ridurre di circa una decade la potenza trasmessa dal satellite, mandando di fatto in pensione sul nascere i grandi e costosi satelliti nazionali per la radiodiffusione.

Se, nel 1990, l'evento sembrò ignorato dalla comunità dei radiodiffusori e dell'industria elettronica di consumo europea, tuttavia in breve tempo la televisione digitale per l'utente domestico divenne una realtà.

Il passo successivo fu compiuto con la *standardizzazione del sistema di codifica video ISO-MPEG-2*, sotto la guida di un altro Centro Ricerche Italiano, lo CSELT. Questo sistema, orientato al mercato di massa, permetteva ulteriori riduzioni della banda trasmissiva (circa 5 Mbit/s per programma televisivo a definizione convenzionale e circa 19 Mbit/s per programma HDTV) e *concentrava la complessità sul codificatore* per ridurre i costi dei ricevitori. Quando i chip per la ricezione MPEG-2 furono disponibili sul mercato, fu l'operatore americano *DirecTV* a lanciare un servizio a pagamento di televisione digitale via satellite, abbandonando l'idea dell'alta definizione. In tal modo la compressione del segnale video nata per trasmettere programmi ad alta qualità, si avviò rapidamente ad essere impiegato per moltiplicare il numero di programmi trasmissibili nella larghezza di banda di un canale in cui era allocato, in precedenza, un solo programma analogico.

L'Europa reagì rapidamente, creando nel 1992 il *Digital Louncing Group*, che diventò in breve il progetto DVB (*Digital Video Broadcasting*). Dopo aver speso alcuni mesi per studiare un sistema di TV/HDTV terrestre, il Gruppo per lo studio del DVB comprese la grande opportunità di business della TV digitale via satellite, dietro la spinta degli operatori della TV a pagamento: l'idea dell'alta definizione fu abbandonata anche a causa della mancanza di televisori commerciali di grandi dimensioni, a favore della possibilità di trasmettere su un unico canale molti programmi a definizione convenzionale.

Fu ancora il Centro Ricerche RAI a svolgere un ruolo fondamentale ed ad assumere il coordinamento dell'attività di definizione del primo standard di trasmissione per TV digitale: ingegneri del Centro presiedettero il gruppo di specialisti del consorzio DVB che in sei mesi, da giugno a dicembre 1993, definì lo *standard di trasmissione DVB-S* [2], una pietra miliare per la diffusione satellitare su base mondiale.

Il sistema per la televisione digitale terrestre DTT (*Digital Terrestrial TV*) europea fu introdotto con lo standard denominato *DVB-T* [3] e nacque circa due anni dopo, in diretta concorrenza con il sistema americano ATSC (*Advanced Television Systems Committee*): il primo a definizione normale e multicanale, particolarmente adatto alla ricezione in condizioni critiche (anche portatile), il secondo ad alta definizione, a programma singolo e meno robusto dal punto di vista trasmissivo. È dal trasmettitore Rai di Torino Eremo che fu diffuso nel 1998 il primo segnale DTT in Italia. La televisione digitale terrestre può oggi rappresentare un'importante frontiera per i *broadcaster* italiani di servizio pubblico e commerciale. Il 2004 ha visto la partenza dei servizi dei grandi operatori nazionali e di alcune emittenti locali e molti nuovi programmi digitali appositamente studiati per tale applicazione cominciano a raggiungere gli utenti. Una novità, oltre all'aumento del numero dei programmi, è costituita dalle applicazioni di TV interattiva basate sulla piattaforma a standard MHP (*Multimedia Home Platform*): servizi di pubblica utilità per il cittadino, *super-teletext*, votazione a distanza all'interno dei programmi televisivi, pubblicità interattiva, giochi, servizi bancari. La televisione potrà anche gradualmente offrire all'utente la navigazione Internet, senza perdere tuttavia le proprie caratteristiche di elettrodomestico di facile utilizzo per tutti.

Ma la tecnologia della televisione digitale è giunta veramente al capolinea? Certamente no e questo articolo intende sintetizzare i recenti progressi tecnologici, individuando i temi principali su cui si stanno impegnando i laboratori di tutto il mondo nell'ambito dello studio dei nuovi sistemi di codifica e di trasmissione, sempre sotto il coordinamento di MPEG e del DVB.



3. GLI STANDARD DI CODIFICA DEL SEGNALE VIDEO CON PARTICOLARE RIFERIMENTO AI NUOVI SISTEMI IN VIA DI DEFINIZIONE

3.1. Richiamo degli standard esistenti di codifica

La trasmissione completa dell'informazione contenuta nel segnale televisivo numerico, descritto nella Raccomandazione ITU-R BT.601, richiederebbe la generazione di un flusso binario caratterizzato da un *bit-rate* estremamente elevato, con un notevole svantaggio rispetto alle diffusioni in tecnica analogica. Si hanno, infatti, 720×576 campioni (*pixel*) per quadro per la componente di luminanza e 360×576 campioni per quadro per ciascuna delle due componenti di cromaticità nonché 25 quadri al secondo e 8 bit per campione, il *bit-rate* necessario risulta perciò di:

$$720 \times 576 + 2(360 \times 576) \times 25 \times 8 = 166 \text{ Mbit/s}$$

Indipendentemente dal tipo di modulazione adottato, la banda occupata dal suddetto segnale sarebbe notevolmente superiore alla capacità di un canale di trasmissione tradizionale da cui la necessità imprescindibile di adottare sistemi in grado di comprimere l'informazione originaria al fine di ridurre la banda occupata.

Allo scopo di definire un sistema standard per la codifica delle immagini in movimento, nel gennaio 1988 fu costituito l'Organismo MPEG (*Motion Picture Expert Group*) come Gruppo di esperti dell'ISO/IEC che fu il vero e proprio Organismo di standardizzazione. Il primo standard prodotto fu MPEG-1 la cui applicazione tipica era prevista in campo multimediale per la codifica video e audio e la memorizzazione su CD-ROM. Attualmente MPEG-1 è caduto in disuso. Lo standard successivamente approvato in MPEG fu MPEG-2 che supporta la codifica del video nel formato 4:2:2 e 4:2:0.

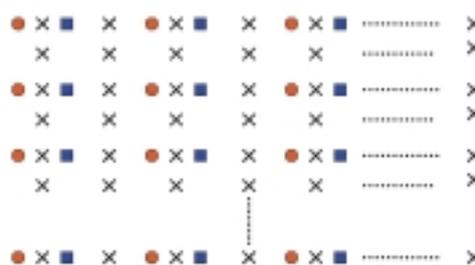
L'algoritmo MPEG-2 effettua la compressio-

Formati di cromaticità. Come già noto dall'esperienza televisiva analogica a colori il sistema visivo umano risulta essere più sensibile alla definizione della luminanza rispetto alla definizione della cromaticità; in ambito analogico questa caratteristica aveva indotto gli speri-

mentatori a limitare la banda disponibile per le informazioni di cromaticità rispetto a quella disponibile per le informazioni di luminanza: il sistema PAL analogico assegna infatti una banda di 5 MHz al segnale di luminanza e 1,3 MHz ai segnali di cromaticità. In ambito numerico questa scelta si traduce nell'esecuzione di un filtraggio della sequenza di campioni di cromaticità allo scopo di ridurre il numero rispetto a quello dei campioni di luminanza introducendo, in tal modo, una perdita di informazione che non pregiudica eccessivamente la qualità percepita dall'utente. Il campionamento delle componenti di cromaticità rispetto a quelle di luminanza dà origine ai cosiddetti *formati di cromaticità*. Due formati di cromaticità comunemente utilizzati in ambito televisivo sono il 4:2:0 ed il 4:2:2. Nel formato 4:2:0 le matrici di cromaticità *Cr* e *Cb* associati a ciascun quadro hanno dimensioni pari a metà della corrispondente matrice *Y* di luminanza sia orizzontalmente che verticalmente, ossia le componenti di cromaticità del segnale analogico originario sono state campionate orizzontalmente e verticalmente con frequenze pari a metà di quella di luminanza; come si può osservare dalla figura A, orizzontalmente i campioni di cromaticità sono associati a campioni alterni di luminanza mentre verticalmente esse occupano righe alterne.

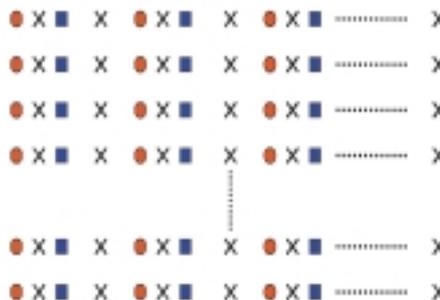
Nel formato 4:2:2, le matrici *Cr* e *Cb* associate a ciascun quadro hanno dimensioni pari a metà della corrispondente matrice *Y* di luminanza soltanto orizzontalmente mentre verticalmente hanno la stessa dimensione, ossia le componenti di cromaticità del segnale analogico originario sono campionate a frequenza spaziale orizzontale pari a metà della frequenza della luminanza e a frequenza spaziale verticale pari a quella di luminanza; come si osserva dalla figura B, infatti, i campioni di cromaticità sono associati a campioni alterni di luminanza orizzontalmente mentre verticalmente non viene saltata nessuna riga.

(X: Campione luminanza ●: Campione cromaticità ■: Campione cromaticità)



A Disposizione dei campioni nel formato 4:2:0

(X: Campione luminanza ●: Campione cromaticità ■: Campione cromaticità)



B Disposizione dei campioni nel formato 4:2:2

ne dell'informazione video secondo quanto riportato qui di seguito:

- compressione senza perdita di informazione basata sullo sfruttamento della ridondanza spaziale (correlazione tra *pixel* adiacenti nel quadro), della ridondanza temporale (correlazione tra quadri/semiquadri nel tempo) e sull'utilizzo di codici a lunghezza variabile, VLC (*Variable-Length Code*);

- compressione con eliminazione dell'irrelevanza, ossia di quell'informazione non più ricostruibile dal decodificatore, ma non percepibile dal sistema visivo umano (codifica psico-visiva);

- compressione con perdita di informazione che si verifica nel caso in cui ridondanza e irrilevanza non siano sufficienti a ottenere la riduzione di *bit-rate* desiderata. L'informazione scartata, non più ricostruibile dal ricevitore, è percepita dal sistema visivo umano come un degradamento dell'immagine.

L'algoritmo MPEG-2 utilizza la trasformata DCT (*Discrete Cosine Transform*) per la riduzione della ridondanza spaziale; l'applicazione della DCT, infatti, abbassa notevolmente la correlazione spaziale tra i pixel del quadro e rende non uniforme la distribuzione statistica dei livelli dei campioni favorendo la successiva codifica con codici a lunghezza variabile, dopo la quantizzazione. Poiché i coefficienti

DCT sono legati al contenuto spettrale dell'immagine e poiché la sensibilità dell'occhio non è uniforme per tutte le frequenze e per tutte le direzioni rispetto all'orizzontale, la codifica psico-visiva, in MPEG-2, è realizzata predisponendo opportune matrici di quantizzazione. I valori sono assegnati in modo da provocare una quantizzazione più grossolana dei coefficienti che corrispondono alle alte frequenze e alla direzione diagonale per le quali la sensibilità dell'occhio umano è inferiore.

Per quanto riguarda lo sfruttamento della ridondanza temporale, MPEG-2 migliora l'approccio predittivo tramite la compensazione del movimento che consente di determinare lo spostamento "locale" in termini di ampiezza, direzione e verso delle singole porzioni costituenti l'immagine. In MPEG-2, la predizione può essere "pura" se avviene tra immagini successive una rispetto all'altra o "interpolativa" se viene utilizzata sia un'immagine precedente che una successiva a quella corrente.

Lo standard MPEG-2 è strutturato secondo profili e livelli, per ciascuno dei quali viene specificato il *bit-rate* massimo che il decodificatore deve essere in grado di elaborare (Figura 1). Riferendosi all'esempio numerico riportato all'inizio del paragrafo, si può notare, per esempio che scegliendo il MainProfile@MainLevel il flusso video originario può essere co-

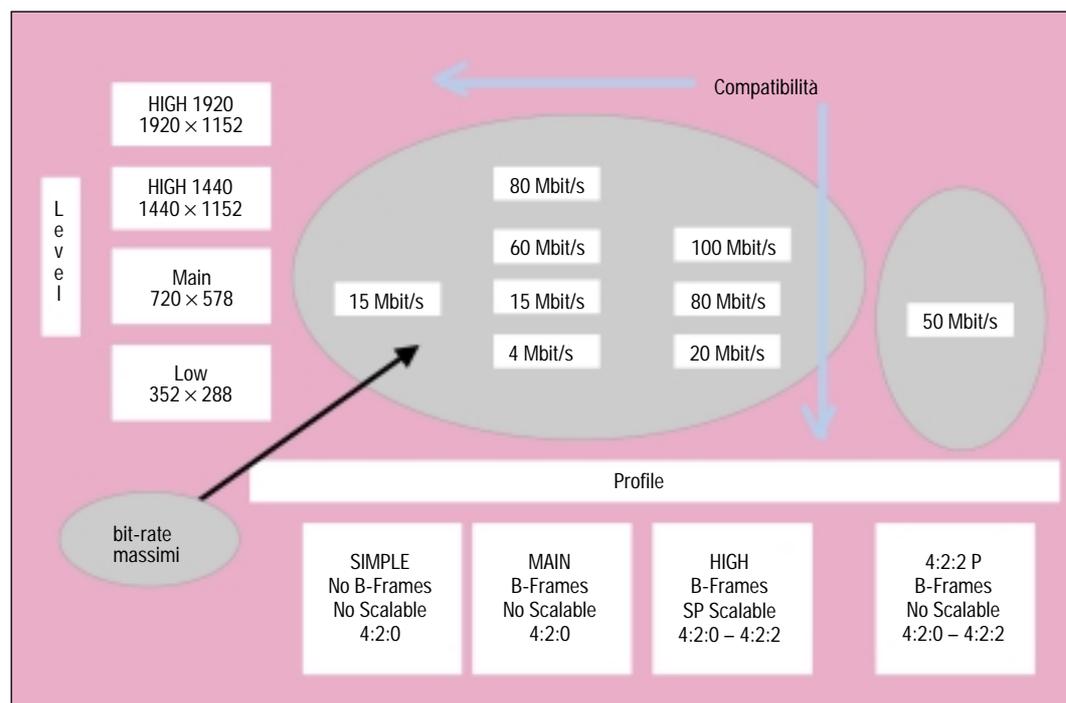


FIGURA 1
Profili e livelli
in MPEG-2

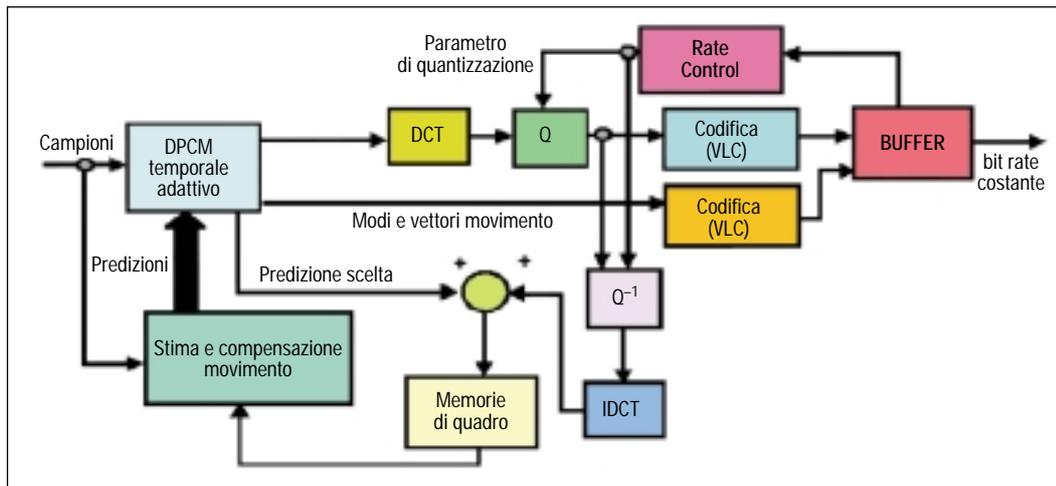


FIGURA 2

Schema a blocchi di un codificatore MPEG-2

dificato fino ad un *massimo* di 15 Mbit/s che corrisponde ad un fattore di compressione pari a 11. Codifiche a *bit-rate* inferiori corrispondono a compressioni maggiori.

La figura 2 riporta invece lo schema di principio di un codificatore MPEG-2.

Il blocco denominato DPCM temporale adattivo calcola gli errori di predizione come differenza tra l'immagine sorgente corrente e l'immagine predetta in base all'immagine precedente (*predizione pura*) o all'immagine precedente e a quella successiva (*predizione interpolativa*). L'adattatività del processo consiste nel fatto che il codificatore può scegliere di codificare i coefficienti sorgente invece degli errori di predizioni se questi sono eccessivamente elevati; il blocco predittivo è completato da stima e compensazione del movimento. La presenza delle memorie di quadro è pertanto necessaria al codificatore per memorizzare i riferimenti per le predizioni. Sui coefficienti della matrice da codificare sono eseguite le operazioni di trasformazione DCT, di quantizzazione e di codifica a lunghezza variabile. La parte retroattiva dello schema serve a ricostruire i riferimenti per le predizioni, analogamente a quanto avviene sul lato ricevitore. Il buffer ha un'importanza fondamentale in quanto con-

sente di ottenere all'uscita del processo di codifica un flusso a *bit-rate* costante; il controllo del *bit-rate* è attuato tramite la *variazione scalare* dei valori di quantizzazione in funzione del riempimento del buffer.

Dal momento in cui è stato normalizzato, il sistema MPEG-2 ha avuto una rapida penetrazione (DVB, ATSC, DVD Forum ...) ed è alla base della maggior parte dei sistemi a livello mondiale di diffusione del segnale video sia per applicazioni *broadcasting* che *webcasting* (diffusione su Internet).

Un cenno a parte merita anche lo standard MPEG-4¹ Parte 2 pubblicato dall'Ente di standardizzazione ISO nel 1999. Come nel caso di MPEG-2, l'efficienza di codifica di questo algoritmo è strettamente dipendente dalle caratteristiche del materiale sorgente e dall'implementazione sul lato codificatore. MPEG-4 è stato studiato per applicazioni legate alla codifica multimediale di contenuti audio-video a bassi *bit-rate*, ma in seguito il campo di applicazione è stato esteso anche al *broadcasting*; le valutazioni soggettive eseguite allo scopo di individuare l'efficienza di codifica di MPEG-4 Parte 2 rispetto a MPEG-2 hanno evidenziato un guadagno del primo sul secondo dell'ordine del 15-20%, ma per il Grup-

¹ Possono anche essere ricordati gli standard MPEG-7 e MPEG-21 che però non si riferiscono alla compressione dei contenuti audio-video, ma piuttosto ne definiscono le modalità di utilizzo. In particolare, MPEG-7 fornisce gli strumenti per la descrizione dei contenuti multimediali audio e video allo scopo di facilitarne estrazione, indicizzazione e gestione, principalmente sui motori di ricerca mentre MPEG-21 è orientato verso la creazione di un "Multimedia Framework" ed opera sull'integrazione di strumenti e linguaggi diversi per la definizione di un ambiente, nel quale interagiscono compressione, protezione dei diritti e possibilità di riconoscere e reperire i contenuti.

po DVB l'efficienza di MPEG-4 non è stata ritenuta tale da giustificare un'eventuale sostituzione di MPEG-2 dato che MPEG-4 non è compatibile con MPEG-2.

Lo standard MPEG-2, come la maggior parte degli standard di codifica, definisce, esclusivamente la sintassi del *bit-stream*, e quindi del decodificatore, lasciando pertanto ai costruttori diversi gradi di libertà nell'implementazione dell'algoritmo presente nel codificatore. I codificatori MPEG-2 esistenti sul mercato presentano pertanto prestazioni differenti a seconda, ad esempio, del tipo di algoritmo utilizzato per la stima del movimento, dei valori nelle matrici di quantizzazione, del tipo di controllo effettuato sul *bit-rate* in funzione della complessità spazio-temporale del segnale originario, ma producono tutti un flusso dati compatibile con un ricevitore MPEG-2.

Se un costruttore agisse, invece, su elementi come il tipo di trasformata, la dimensione dei blocchi elementari in fase di codifica, il tipo di codifica con codici a lunghezza variabile, VLC (*Variable-Length Code*), il numero di quadri utilizzati per la compensazione del movimento produrrebbe un *bit-stream* e quindi un nuovo sistema di compressione non più compatibile con un decoder MPEG-2 e con prestazioni differenti da quelle di MPEG-2.

È proprio allo scopo di creare un nuovo sistema di compressione caratterizzato da un'elevata efficienza di codifica che, nel 2001, gli Organismi di standardizzazione ISO²/IEC (MPEG) e ITU³, e in particolare per quest'ultimo il VCEG (*Video Coding Expert Group*), costituirono il JVT (*Joint Video Team*) e cioè un gruppo di lavoro congiunto per la definizione di un sistema avanzato di codifica, denominato AVC (*Advanced Video Coding*).

3.2. I nuovi sistemi di codifica H.264 e VC.9

Il sistema AVC specifica la codifica del video, VCL (*Video Coding Layer*) ed il formato con cui organizzare i dati video per il trasporto e la memorizzazione, NAL (*Network Abstraction Layer*). Nel 2003 l'AVC è stato integrato come Parte 10 dello standard MPEG-4 ISO/IEC 14496-10 (pur essendo totalmente diverso come finalità dall'MPEG-4 originale) e con il nome di H.264 in ITU [4], denominazione che è conveniente utilizzare per evidenziarne le caratteristiche innovative. L'approvazione finale congiunta da parte di ISO e ITU era prevista per giugno 2003 ma è slittata a ottobre 2004. Lo standard AVC, così come avviene nel caso di MPEG-2, definisce la sintassi del flusso dati ed il metodo di decodifica.

Come detto precedentemente, lo standard AVC non produce un *bit-stream* compatibile con MPEG-2. L'adozione di AVC richiederà quindi l'utilizzo di nuovi apparati sia per la codifica che per la decodifica.

Il nuovo standard prevede quattro profili, rivolti ad applicazioni differenti:

■ **Baseline Profile**, destinato ad applicazioni a basso ritardo *end-to-end*, applicazioni mobili, videotelefonìa;

■ **eXtended Profile**, per applicazioni mobili e per *streaming*;

■ **Main Profile**, rivolto ad applicazioni diffuse SDTV (*Standard Definition Television*).

■ **FRExt (Fidelity Range Extensions) Profiles** per applicazioni professionali di contribuzione, editing in studio e HDTV (*High Definition Television*).

Lo schema a blocchi di riferimento per il codificatore H.264 è riportato nella figura 3. Come

² ITU (*International Telecommunication Union*): è un Organismo internazionale che ha il compito di governare e coordinare tutte le attività e i servizi attinenti alle tecnologie di telecomunicazione. Costituita nel lontano 1865 come Convenzione Telegrafica Internazionale da 20 nazioni e dal 1934 mutatasi in International Telecommunication Union, ITU seguì tutta l'evoluzione delle telecomunicazioni, dal telegrafo al telefono, fino alle trasmissioni radio, nell'etere, su cavo o i recenti sistemi ottici e satellitari. Dal 1947 ITU è un'Agenzia specializzata delle Nazioni Unite. Oggi ai lavori dell'ITU partecipa la quasi totalità dei Paesi e del mondo.

³ ISO (*International Standardization Organization*): costituita nel 1947, l'ISO è una Federazione non governativa che abbraccia oltre 130 Enti normatori di altrettante nazioni a livello mondiale. L'ISO promuove lo sviluppo e l'unificazione normativa per consentire e facilitare lo scambio dei beni e dei servizi. Coordina l'ambiente scientifico, tecnologico ed economico e fissa riferimenti vincolanti per una vastità di settori quali informatica, meccanica, elettrica ... I lavori dell'ISO sono il risultato di lunghi accordi internazionali e danno luogo a *International Standard*. I Paesi aderenti all'accordo, tramite i singoli comitati di standardizzazione nazionali, s'impegnano a introdurre gli "International Standard" nelle corrispondenti norme nazionali.

Profilo	Stima preliminare dell'efficienza rispetto a MPEG-2	Aumento della complessità stimata per il decodificatore H.264*
Baseline	Circa 1,5	Circa 2,5 volte
Extended	Circa 1,75	Circa 3,5 volte
Main	Circa 2	Circa 4 volte

* Il codificatore è circa otto volte più complesso

TABELLA 1
Aumento di complessità e efficienza passando da MPEG-2 a H.264/MPEG-4 AVC
(Fonte: www.m4if.org)

L'elevata efficienza di compressione fa sì, inoltre, che gli ambiti di applicazione del sistema H.264 siano estremamente versatili; ad esempio, nelle reti mobili, Organizzazioni come il 3GPP (3rd Generation Partnership Project) hanno affiancato ai sistemi di codifica H.263 e MPEG-4 anche l'H.264 nel profilo *Baseline*, data la limitata disponibilità di banda che caratterizza le reti di terza generazione.

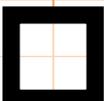
L'H.264 si pone come candidato interessante anche per applicazioni in reti a larga banda (xDSL, fibra ottica) in cui il segnale video è fruibile in modalità *streaming*, *download* o *video on demand* su un PC o su un televisore. Per quanto riguarda la diffusione televisiva con definizione standard, l'efficienza del 50% rispetto a MPEG-2 ha fatto sì che l'H.264 venisse preso in considerazione anche in ambito DVB. Al momento della redazione di questo articolo, infatti, un gruppo di lavoro DVB sta redigendo le Raccomandazioni tecniche per l'inclusione dello standard H.264 come sistema opzionale per la diffusione televisiva digitale affianco a MPEG-2. Sempre lo stesso Gruppo sta lavorando alle specifiche per la trasmissione del flusso codificato H.264 sia su TS (*Transport Stream* formato di trasporto di dati definito dallo standard ISO/IEC 13818) che su IP (*Internet Protocol*). L'adozione di H.264 consentirebbe infatti di aumentare la capacità in termini di numero di programmi disponibili nei *bouquet* dei sistemi diffusivi DVB a fronte però di nuovi investimenti legati alla necessità di sostituire l'attuale parco di STB (*Set Top Box*) MPEG-2 con nuovi apparati in grado di decodificare entrambi i sistemi di compressione. Infine, la diffusione presso l'utente finale

dei display a schermi piatti (Plasma, LCD,...) ha riaperto tutta una serie di problematiche inerenti alla trasmissione della HDTV. In particolare, i *bit-rate* necessari ad ottenere una qualità trasparente per l'HDTV si aggiornano, nel caso di codifica MPEG-2, intorno ai 18-20 Mbit/s un solo canale HDTV occuperebbe perciò l'intero canale trasmissivo dei sistemi di trasmissione DVB. Le prestazioni dello standard H.264 risultano pertanto interessanti nel caso in cui il *broadcaster* decidesse di affiancare l'HDTV alla SDTV.

Anche il gruppo di lavoro DVB-H, per lo studio dello standard di diffusione televisiva verso i sistemi mobili e di cui si dirà nel seguito, sta considerando la possibilità di utilizzare per la *mobile television* l'H.264 sia il profilo *baseline* che il *main* data la maggiore banda disponibile rispetto ai sistemi 3G. È importante completare questa panoramica ricordando che sul mercato si sono affacciati sistemi di codifica proprietari e concorrenti dello standard H.264, come per esempio *Real Video*, *On2*, *Sorenson*.

Un cenno a parte merita il codificatore WM9 (*Windows Media 9*) [6], basato su tecnologia Microsoft, che fino agli inizi del 2004 apparteneva alla categoria dei sistemi di codifica proprietari. Nel marzo del 2004, Microsoft ha presentato all'Organismo SMPTE (*Society for Motion Picture and Television Engineers*) il documento *Proposed SMPTE Standard for Television: VC-9 compressed video bitstream format and decoding Process* per la standardizzazione del proprio sistema di codifica, di cui WM9 non è altro che un'implementazione.

L'approvazione finale dello standard è prevista per dicembre 2004. La tabella 2 riporta il confronto tra MPEG-2, H.264 e VC9 in termini di caratteristiche degli algoritmi di compressione. Dall'analisi delle caratteristiche riportate nella tabella 2, il VC9 e l'H.264 sembrano molto simili. Al momento della redazione di questo articolo non si dispone di dati che forniscano un'idea dell'efficienza e della complessità del sistema VC9 rispetto ad H.264. La Microsoft ha comunque affermato che le prestazioni di VC9 sono confrontabili con quelle dello standard H.264 mentre la *complessità* di VC9 è inferiore a quella di H.264 e confrontabile con quella di MPEG-2.



	MPEG-2	H.264	VC9
Profili	<input type="checkbox"/> Simple <input type="checkbox"/> Main <input type="checkbox"/> High <input type="checkbox"/> 4:2:2	<input type="checkbox"/> Baseline <input type="checkbox"/> Main <input type="checkbox"/> Extended <input type="checkbox"/> FExt	<input type="checkbox"/> Simple <input type="checkbox"/> Main <input type="checkbox"/> Advanced
Input	<input type="checkbox"/> Interlacciato <input type="checkbox"/> Progressivo	<input type="checkbox"/> Interlacciato <input type="checkbox"/> Progressivo	<input type="checkbox"/> Interlacciato <input type="checkbox"/> Progressivo
Tipo di algoritmo	Ibrido (ridondanza spaziale/temporale)	Ibrido (ridondanza spaziale/temporale)	Ibrido (ridondanza spaziale/temporale)
Struttura di codifica	Gerarchica	Gerarchica	Gerarchica
Tipi di immagine	I, P, B	I, P, B, SP, SI	I, P, B, BI
Struttura di macroblocco	<input type="checkbox"/> 16 × 16 Y <input type="checkbox"/> 8 × 8 Cb <input type="checkbox"/> 8 × 8 Cr	<input type="checkbox"/> 16 × 16 Y <input type="checkbox"/> 8 × 8 Cb <input type="checkbox"/> 8 × 8 Cr	<input type="checkbox"/> 16 × 16 Y <input type="checkbox"/> 8 × 8 Cb <input type="checkbox"/> 8 × 8 Cr
Accuratezza nella stima del movimento	Fino a 1/2 pixel	Fino a 1/4 pixel	Fino a 1/4 pixel
Dimensioni del blocco minimo su cui è applicata la compensazione del movimento	8 × 8	4 × 4	4 × 4
Loop <i>filter</i> per ridurre l'effetto della blocchettizzazione	Assente	Presente	Presente
Tipo di trasformata	DCT	Intera	Intera
Codifica entropica	VLC	<input type="checkbox"/> CAVLC <input type="checkbox"/> CABAC	VLC

4. GLI STANDARD TRASMISSIVI E LA LORO ARCHITETTURA CON PARTICOLARE RIFERIMENTO AI NUOVI SISTEMI IN VIA DI DEFINIZIONE

4.1. Architettura dei sistemi diffusivi DVB

I sistemi DVB per la diffusione televisiva (satellite DVB-S, via cavo DVB-C, terrestre DVB-T), sono caratterizzati da una struttura comune, schematicamente rappresentata in figura 4. In realtà con la denominazione DVB si intende la struttura completa impiegata per la diffusione dei segnali che include la codifica di sorgente e la multiplazione: tuttavia, poiché gli standard di codifica adottati sono quelli MPEG, il lavoro del Gruppo DVB si è concentrato essenzialmente sugli standard di trasmissione. La *codifica di sorgente e la multiplazione si*

basano sullo standard MPEG-2, che genera in uscita un segnale di multiplazione di trasporto con pacchetti di lunghezza fissa di 188 byte (1 byte di sincronismo, 3 di prefisso - contenenti gli identificatori di pacchetto - e 184 byte utili). Il multiplex è flessibile e consente di convogliare in un singolo flusso numerico segnali relativi a un gran numero di programmi televisivi, ciascuno comprendente le relative informazioni video, audio e dati.

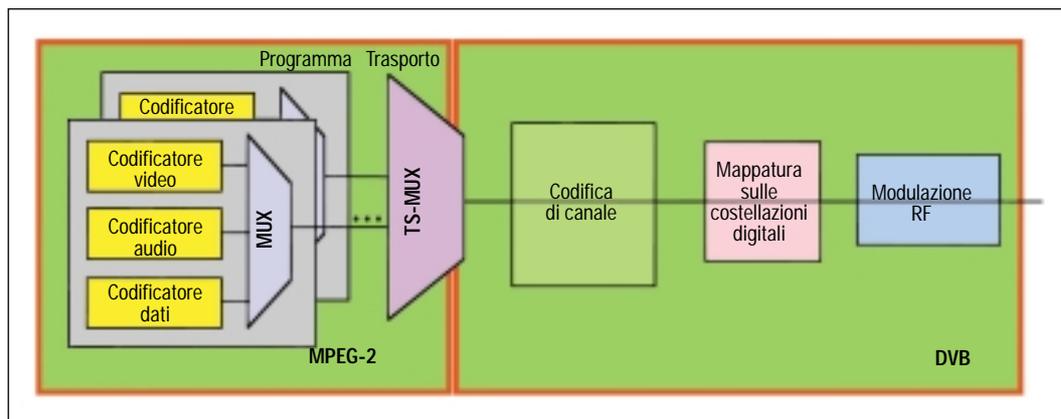
Canali di servizio aggiuntivi sono inoltre previsti per indicare i vari programmi inseriti all'interno del multiplex (*Service Information, SI*), per attuare l'accesso condizionato (*Conditional Access, CA*), per fornire una guida elettronica dei programmi (*Electronic Program Guide, EPG*).

L'adattamento al canale trasmissivo (in par-

TABELLA 2

Confronto tra le caratteristiche di compressione degli algoritmi VC9, AVC e MPEG-2

FIGURA 4
 Schema a blocchi
 generale
 di un sistema
 di diffusione DVB



tiolare la scelta della codifica di canale e del tipo di modulazione da adottare) è invece stato sviluppato dal Gruppo di studio DVB, ed è specifico di ogni mezzo per adeguarsi al tipo di disturbi da contrastare. Ciononostante il DVB ha voluto mantenere la massima comunanza possibile fra i tre principali sistemi diffusivi standardizzati e in particolare:

- per i sistemi DVB-S e DVB-T la protezione contro gli errori è realizzata mediante la concatenazione di un *codice esterno a blocco* di tipo Reed-Solomon (che opera sui pacchetti MPEG-2 da 188 byte) e di un *codice interno convoluzionale* (con possibilità di scegliere tra diversi rapporti di codifica da 1/2 a 7/8); il sistema DVB-C, molto meno critico, adotta il solo codice esterno Reed-Solomon;

- le costellazioni digitali adottate per la modulazione sono: per il DVB-S la QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), costituita da quattro punti posti su un cerchio, molto robusta e caratterizzata da un involuppo costante (e quindi particolarmente idonea per gli amplificatori non lineari usati nei satelliti); per il DVB-T la QPSK assieme alle modulazioni 64QAM e 16QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), costituite da punti posti su una griglia regolare, con efficienza spettrale crescente con l'aumentare del numero di punti; per il DVB-C la QPSK, con le modulazioni 16QAM, 32QAM e 64QAM.

- la modulazione a radiofrequenza del segnale è invece fortemente dipendente dal canale di trasmissione: i sistemi DVB-S e DVB-C sono a singola portante, il sistema DVB-T è invece **multiportante** COFDM per

contrastare la propagazione multicammino (*multipath*) del segnale in ambiente terrestre (come i codici correttori con opportune strategie proteggono dagli errori *a burst*, così la modulazione multicanale protegge dai fading selettivi che possono “distruggere” porzioni dello spettro occupato dal segnale).

4.2. Il sistema di trasmissione via satellite di seconda generazione DVB-S2

4.2.1. GENERALITÀ SUL DVBS-2

Nel 2003, a dieci anni dalla nascita del DVB, è stato standardizzato il sistema di seconda generazione per la trasmissione via satellite, DVB-S2 [7], erede del sistema di diffusione della televisione digitale da satellite DVB-S, attualmente usata dalla maggior parte degli operatori satellitari nel mondo.

Il sistema DVB-S2 è stato progettato per varie applicazioni satellitari a larga banda: servizi diffusivi di TV a definizione standard (SDTV) e ad alta definizione (HDTV), applicazioni interattive per l'utenza domestica e professionale, compreso l'accesso a Internet, servizi professionali di contribuzione TV e SNG (*Satellite News Gathering*), distribuzione di segnali TV a trasmettitori digitali terrestri VHF/UHF, distribuzione di dati e di siti Internet (*Internet trunking*).

Sono tre i concetti chiave in base cui lo standard DVB-S2 è stato definito: *maggior capacità trasmissiva* rispetto ai sistemi di prima generazione ed in particolare al DVB-S, *totale flessibilità* e *ragionevole complessità del ricevitore*.

Per ottenere il bilanciamento tra prestazioni

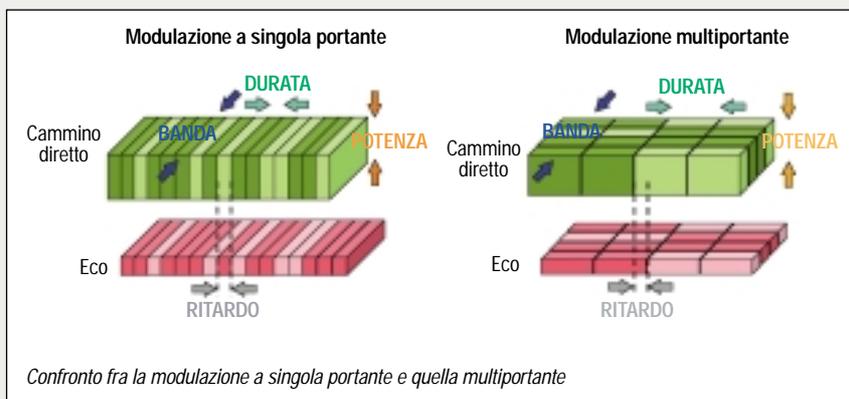
La modulazione **multiportante** COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) permette di suddividere il flusso di informazione a velocità di R_s in un numero elevato n di flussi a velocità R_s/n , e anteporre al simbolo OFDM un *intervallo di guardia* temporale (con durata T_g pari ad una frazione di quella di simbolo utile T_u) che separa simboli OFDM adiacenti. L'intervallo di guardia è la continuazione ciclica della parte utile T_u del simbolo e viene scartato dal ricevitore, cosicché gli echi che raggiungono il ricevitore con un ritardo τ inferiore a T_g non generano interferenza intersimbolica (*Inter Symbol Interference, ISI*).

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 attenuate dal canale di trasmissione.

La mutua ortogonalità è garantita dalla spaziatura in frequenza $1/T_u$ tra le portanti pari alla velocità di simbolo R_s . Il processo OFDM è attuato per mezzo di una I-FFT (*Inverse Fast Fourier Transform*).

Il sistema DVB-T è dotato di due modalità operative: 2K, con FFT su 2048 portanti di cui 1705 attive per le reti di diffusione convenzionali multifrequenza (MFN, *Multy Frequency Network*) e durata utile del simbolo di $224 \mu s$, e 8K, con FFT su 8192 portanti di cui 6817 portanti attive e durata utile del simbolo di $896 \mu s$ per operare anche su reti a singola frequenza (SFN, *Single Frequency Network*) e consentire un'utilizzazione ottimale dello spettro. Quattro diverse opzioni sono previste per l'intervallo di guardia, precisamente $1/32$, $1/16$, $1/8$, $1/4$ della durata utile di simbolo, con valori compresi tra 7 e $224 \mu s$.

La modulazione COFDM permette quindi di contrastare echi con ritardi molto elevati, indipendentemente dal livello di potenza del segnale principale ed è idonea per il canale terrestre. Anche il canale via cavo è caratterizzato da echi, che però sono generalmente molto meno critici, sia come durata che come potenza relativa. In tal caso le modulazioni classiche a singola portante con equalizzazione al ricevitore sono sufficienti per contrastare gli echi presenti sul canale di trasmissione. L'equalizzatore è generalmente una linea a prese di ritardo di lunghezza pari ad alcune volte il massimo ritardo che si vuole equalizzare, e funziona bene in presenza di echi corti (qualche μs), pressoché stabili nel tempo e attenuati rispetto al segnale principale (almeno 5-6 dB).



e complessità, il DVB-S2 si avvale dei più recenti sviluppi nella codifica di canale e nella modulazione. La codifica di canale è basata sui codici LDPC (*Low Density Parità Check*), una famiglia di codici a blocco molto semplici, con struttura algebrica molto limitata, scoperti nel 1960, ma soltanto oggi utilizzabili nei prodotti consumer, grazie ai progressi della tecnologia dei microcircuiti⁴. Quattro sono i tipi di modulazione presenti nella norma DVB-S2: QPSK, 8 PSK, 16 APSK (*Amplitude Phase Shift Keying*), 32 APSK⁵.

L'adozione nel DVB-S2 di queste tecniche innovative di codifica e modulazione garantisce un aumento di capacità dell'ordine del 30 per cento rispetto al DVB-S operando in mo-

do CCM (*Constant Coding & Modulation*, letteralmente Modulazione e Codifica Costanti), ossia con parametri di trasmissione fissi: il DVB-S non prevedeva, infatti, di poter cambiare i parametri durante la trasmissione.

Nelle applicazioni punto-punto, come ad esempio l'*IP Unicast*, il guadagno del DVB-S2 rispetto al DVB-S può essere ancora maggiore. La funzione ACM (*Adaptive Coding & Modulation*, letteralmente Modulazione e Codifica Adattative) permette infatti di variare lo schema di modulazione ed i livelli di protezione dagli errori per ogni nuovo blocco elementare di codifica, ottimizzando il sistema di trasmissione alle condizioni di ricezione dell'utente. Per comunicare al tra-

⁴ La massima complessità ammessa per il *decoder* era fissata in 14 mm^2 di silicio con tecnologia $0,13 \mu m$, e la velocità di simbolo di riferimento di 55 MBaud. Dal 2004 per i prodotti elettronici consumer è disponibile una tecnologia di $0,09 \mu m$, che dovrebbe ulteriormente aumentare il numero di componenti integrabili riducendo la complessità dell'intero ricevitore.

⁵ I parametri delle modulazioni 16 APSK e 32 APSK sono state ottimizzati per operare su un trasponditore non lineare, collocando i vari punti sul bordo di cerchi; le prestazioni fornite da un modulatore su un canale lineare sono paragonabili rispettivamente con quelle delle modulazioni 16 QAM e 32 QAM.

smettitore le condizioni di ricezione del singolo utente, il sistema deve operare "ad anello chiuso", utilizzando un canale di ritorno per esempio via telefono o satellite. Il DVB-S2 è così flessibile da adattarsi a tutti i tipi di trasponditori satellitari esistenti, grazie ad un'ampia varietà di efficienze spettrali e di rapporti segnale/rumore C/N (*Carrier to Noise*), richiesti. Esso, inoltre, è progettato per trattare una grande varietà di formati audio-video e di dati, dall'MPEG-2 oggi utilizzato negli standard DVB, a quelli che il progetto DVB sta ora definendo per le applicazioni future: H264 e VC9 (si veda il paragrafo 3). Il sistema DVB-S2 si adatta a qualunque formato di flusso di dati in ingresso, compresi flussi digitali MPEG-TS (*Transport Stream*), singoli o multipli, o flussi in formato IP e ATM. Questo fa sì che anche se in futuro saranno definiti altri formati, essi potranno essere impiegati senza bisogno di modificare il sistema.

Il nuovo sistema DVB-S2 non è purtroppo compatibile con i ricevitori oggi esistenti. Per permettere ai *broadcaster* di attuare una transizione graduale, mantenendo in esercizio i sistemi DVB-S attuali⁶ e contemporaneamente aumentando la capacità trasmessa per i servizi dedicati ai nuovi ricevitori DVB-S2, lo standard DVB-S2 definisce, in maniera opzionale, modalità trasmissive compatibili con il sistema DVB-S. In particolare, potranno essere presenti due flussi di dati TS, il primo ad alta priorità (*High Priority*, HP), compatibile con i ricevitori DVB-S attuali e con i nuovi ricevitori DVB-S2, il secondo a bassa priorità (*Low Priority*, LP), compatibile soltanto con i ricevitori DVB-S2. Questi flussi vengono inviati su un singolo canale satellitare, multiplati in modo sincrono a livello di simbolo di modulazione su una costellazione 8PSK non uniforme, con livelli diversi di protezione dagli errori (modulazione gerarchica). Poi-

ché il segnale risultante ha un inviluppo quasi-costante, esso può essere trasmesso su un singolo *transponder*, portato quasi alla saturazione.

In alternativa lo standard propone (senza definirne le modalità trasmissive) l'utilizzo delle modulazioni stratificate (*Layered Modulation*), dove un segnale DVB-S2 e uno DVB-S sono combinati in modo asincrono sul canale a radio-frequenza, con il segnale DVB-S trasmesso a un livello di potenza assai più elevato del DVB-S2. Poiché il segnale risultante mostra sensibili variazioni di inviluppo, in questo caso esso deve essere trasmesso su un trasponditore quasi-lineare, lontano dalla saturazione⁷.

Il sistema DVB-S2 è strutturato come una "scatola di attrezzi" (in inglese *tool-kit*), e cioè come un insieme di tecniche che permettono di coprire tutte le aree applicative, realizzabili in *single-chip* con complessità ragionevole, per permettere di utilizzare prodotti destinati al mercato di massa anche per applicazioni professionali.

Esso è composto da una sequenza di blocchi funzionali, come illustrato nella figura 5 e descritto in dettaglio in [6].

Il blocco identificato come *Adattatore di modo e di flusso* fornisce l'interfaccia per il flusso di ingresso, strumenti opzionali richiesti per l'ACM (per esempio per la sincronizzazione e la cancellazione dei pacchetti nulli nel caso di flussi di ingresso del tipo TS) e inserisce la codifica CRC (*Cyclic Redundancy Check*) per permettere al ricevitore di rivelare la presenza di errori nel flusso ricevuto. Inoltre, nel caso di ingressi multipli, esso unisce i flussi di ingresso (*merger*) per poi suddividerli (*slicer*) in blocchi del codice FEC (*Forward Error Correction*). Questi ultimi sono composti da bit presi da una sola porta di ingresso da trasmettere in modo omogeneo (con la stessa modulazione e con il codice FEC).

⁶ Il successo ottenuto dallo standard DVB-S tradizionale ha portato a un'elevata diffusione dei STB (*Set Top Box*) DVB-S per la ricezione a casa dell'utente.

⁷ Come alternativa, per meglio sfruttare le risorse di potenza del satellite, i segnali HP e LP possono essere trasmessi indipendentemente sulla tratta in salita del collegamento satellitare (*up-link*), amplificati ciascuno da un amplificatore da satellite indipendente (HPA, *High Power Amplifier*) portato vicino alla saturazione, ed essere combinati sulla tratta di discesa (*down-link*). Ciò richiede però la progettazione ed il lancio di una nuova generazione di satelliti.

Si inserisce poi l'intestazione di *banda base* (80 bit) davanti al campo dati per informare il ricevitore del formato del flusso di ingresso e del tipo di "adattamento" utilizzato. Nel caso i dati di utente disponibili per la trasmissione non siano sufficienti a riempire completamente il BBFRAME, blocco di banda base, si provvederà a completarlo con bit di riempimento. In ultimo, nel blocco denominato *stream adapter* il BBFRAME viene moltiplicato per una sequenza pseudocasuale (*scrambler*), che uniformemente distribuisce gli zeri e gli uno del BBFRAME, evitando la presenza di sequenze critiche per il codice FEC.

Il blocco *Codifica FEC* effettua la codifica concatenata del codice esterno BCH e del codice interno LDPC. I rapporti di codifica del codice LDPC interno sono $1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10$, da scegliersi congiuntamente allo schema di modulazione in base ai requisiti del sistema. A seconda dell'area di applicazione i blocchi di codice FEC (FECFRAME), possono avere una lunghezza di 64,8 o 16,2 kbit. L'introduzione di due possibili valori è stata dettata da due esigenze opposte: le prestazioni in funzione del rapporto C/N migliorano al crescere della lunghezza dei blocchi di codifica, ma, al contempo, aumenta molto il ritardo globale della catena trasmissiva. Quindi, per applicazioni non critiche per i ritardi (come per esempio la diffusione di programmi), sono preferibili i blocchi lunghi, mentre per le applicazioni interattive un blocco più corto può essere più efficiente: infatti un pacchetto di informazio-

ne "corto" è immediatamente messo in onda dalla stazione trasmittente. La modulazione e il codice FEC sono costanti all'interno del FECFRAME, e possono cambiare in differenti FECFRAME nelle modalità VCM (*Variable Coding & Modulation*) e ACM. Il segnale trasmesso può anche contenere FECFRAME corti e normali.

Il blocco *Mapping* associa i bit alla costellazione: QPSK, 8PSK, 16APSK o 32APSK a seconda dell'applicazione. Tipicamente, per applicazioni *broadcast* vengono proposte le costellazioni QPSK e 8PSK, poiché sono di fatto modulazioni ad inviluppo costante e possono essere usate su *transponder* da satellite non lineari portati vicino alla saturazione. Le modalità 16APSK e 32APSK sono invece principalmente orientate ad applicazioni professionali; possono anche essere impiegate per il *broadcasting*, ma richiedono la disponibilità di un più elevato livello di C/N al ricevitore e l'adozione di metodi avanzati di pre-distorsione nella stazione di *up-link* per attenuare gli effetti di non-linearità del *transponder*. Sebbene non permettano efficienze di potenza analoghe agli schemi ad inviluppo costante, queste costellazioni offrono però una maggiore capacità trasmissiva.

Il blocco di *Generazione della trama PL (Physical Layer)*, sincrono con i FECFRAME, gestisce l'inserzione dell'intestazione di livello fisico e dei simboli pilota opzionali (2,4% di perdita di capacità), di PLFRAME fittizi (*dummy frame*) in assenza di dati utili pronti per la trasmissione, e la moltiplicazione per

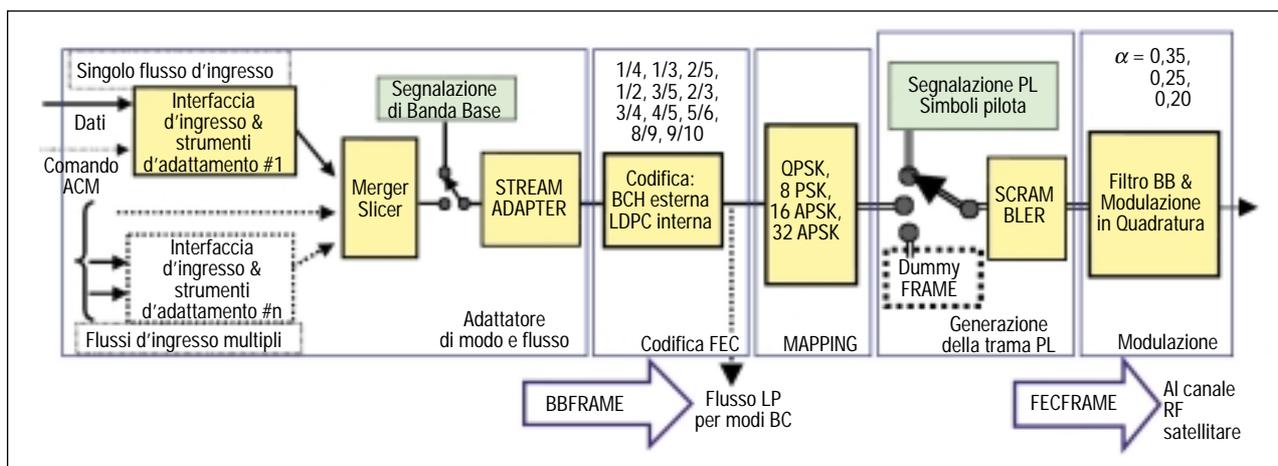


FIGURA 5

Schema a blocchi funzionale del sistema DVB-S2

una sequenza pseudo-casuale (*scrambler*) per la dispersione dell'energia.

Il *filtraggio* in banda base e la *modulazione* in quadratura si applicano per modellare lo spettro del segnale e per generare il segnale a radio frequenza. Il filtro usato in trasmissione è la radice quadrata del filtro a coseno rialzato con tre possibili coefficienti di *roll-off* α : 0,35 per continuità con il DVB-S, 0,25 e 0,20 per i casi in cui si abbiano maggiori limitazioni di banda.

4.2.2. LE PRESTAZIONI DEL SISTEMA DVBS-2

Il DVB-S2 permette di selezionare lo schema di modulazione ed il tasso di codifica a seconda dei requisiti del servizio e delle caratteristiche del *transponder* per satellite impiegato. L'efficienza spettrale va da 0,5 bit/s/Hz, usando la modulazione QPSK 1/4, a 4,5 bit/s/Hz, usando la configurazione 32 APSK 9/10, mentre il rapporto segnale rumore passa da -2.4 dB a 16 dB (per canale gaussiano e demodulazione ideale), per garantire una ricezione QEF (*Quasi Error Free*, quasi priva di errori), definita per il DVB-S2 come la ricezione di meno di un pacchetto errato per ora di trasmissione per un servizio video a 5 Mbit/s, corrispondente a un tasso d'errore sul pacchetto (*Packet Error Rate*, PER) TS circa pari a 10^{-7} . Il grafico di figura 6 mostra l'efficienza spettrale del sistema DVB-S2 in funzione del rapporto C/N richiesto per ricezione QEF, riferito alla

potenza media del segnale; esso è stato ottenuto attraverso simulazioni al computer, su un canale affetto da rumore additivo Gaussiano bianco AWGN, e nel caso di una demodulazione ideale. Le linee tratteggiate si riferiscono al limite teorico (*limite di Shannon*), variabile in funzione del tipo di modulazione. Sulle ordinate è riportato il rapporto tra il *bit rate* utile R_u , e la velocità di trasmissione di simbolo R_s . Le curve non tengono conto delle distorsioni e dei degradamenti introdotti dal canale di trasmissione satellitare.

4.2.3. ESEMPI DI POSSIBILI USI DEL SISTEMA DVBS-2

4.2.3.1. Diffusione televisiva

L'utilizzo del DVB-S2 per la diffusione televisiva a definizione convenzionale SDTV in modalità CCM, come già visto, offre un guadagno in termini di capacità del DVB-S2 rispetto al DVB-S, dell'ordine del 30%. Il guadagno diventa ancora maggiore se lo si combina con la sostituzione della codifica MPEG-2 con quella H.264, riducendo drasticamente il costo per canale della capacità trasmissiva del satellite.

Il DVB-S2, inoltre grazie alla sua flessibilità, permette di differenziare la protezione contro gli errori per ogni multiplex (con modalità VCM): un'applicazione tipica è la trasmissione di un multiplex molto protetto contro gli errori per la televisione SDTV e di un multi-

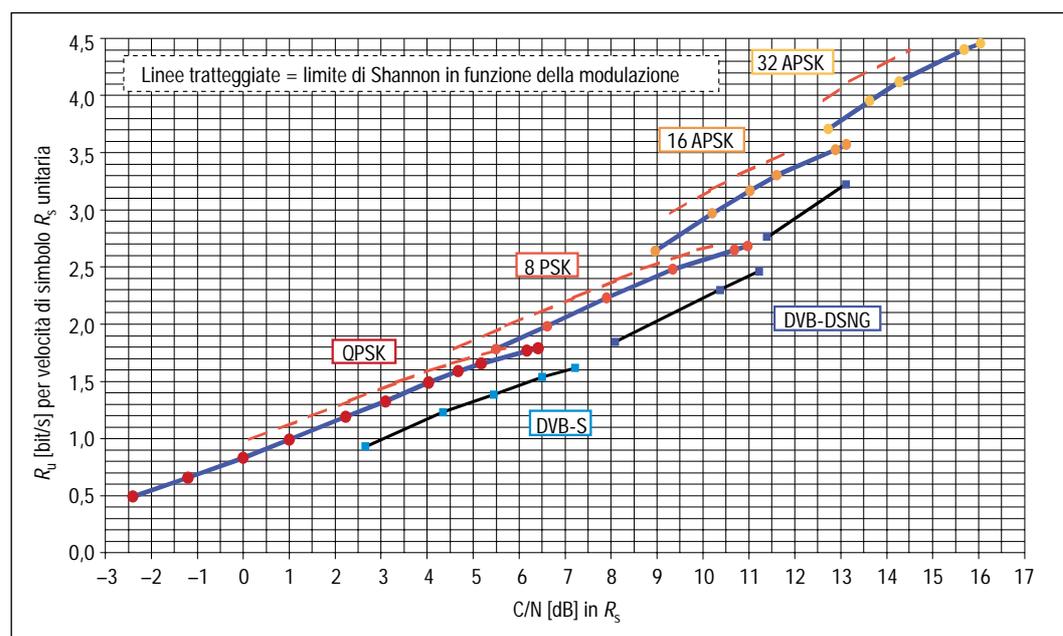


FIGURA 6

Efficienza spettrale in funzione del rapporto C/N richiesto su canale AWGN

plex meno protetto per servizi televisivi ad alta definizione HDTV.

4.2.3.2. Distribuzione del multiplex MPEG ai trasmettitori DTT

Molti Paesi stanno introducendo la televisione digitale terrestre (*Digital Terrestrial Television*, DTT) ed il satellite è uno dei mezzi candidati a distribuire i flussi MPEG ai trasmettitori digitali terrestri. I sistemi attualmente operativi si basano sul sistema DVB-S, che però permette la trasmissione di un singolo multiplex MPEG per segnale. Il risultato è che per la distribuzione di n multiplex MPEG, dovrebbero essere trasmesse n portanti per trasponditore satellitare, richiedendo perciò un elevato OBO (*Output Back Off*) dell'amplificatore satellitare, per un funzionamento quasi lineare (in alternativa all'uso di n trasponditori). L'adozione del sistema DVB-S2 permette di distribuire più multiplex MPEG, usando una configurazione a singola portante per trasponditore, ottimizzando così l'efficienza in potenza attraverso la saturazione dell'amplificatore del satellite.

4.2.3.3. Codifica e modulazione adattativa ACM per servizi punto-punto

Nelle applicazioni interattive punto-punto l'utilizzo della modalità adattativa ACM del DVB-S2 permette di recuperare il cosiddetto "margine a cielo chiaro" (tipicamente da 4 a 8 dB), inutilizzati⁸ per la maggior parte del tempo nei collegamenti satellitari convenzionali impieganti schemi CCM (*Constant Coding and Modulation*), raddoppiando o addirittura triplicando così la capacità media del satellite e riducendo drasticamente i costi del servizio. Inoltre il guadagno dell'ACM rispetto al sistema a parametri fissi CCM aumenta in condizioni critiche di propagazione: quindi un sistema adattativo di tipo ACM è perciò fondamentale per le bande di frequenza più elevate (come per esempio la banda Ka) o per l'impiego in zone climatiche tropicali.

Il modulatore DVB-S2 ACM (Figura 7) opera

ad una velocità di simbolo costante, poiché si assume costante la larghezza di banda del transponder. L'ACM è implementato dal modulatore DVB-S2 attraverso la trasmissione di una sequenza in multiplazione a divisione di tempo (*Time Division Multiplexing*, TDM) di sequenze di *frame* del livello fisico DVB-S2, dove il formato di codifica e modulazione possono cambiare ad ogni nuovo *frame*. La continuità di servizio è ottenuta, durante i periodi con forti attenuazioni da pioggia, riducendo il *bit rate* d'utente, e contemporaneamente aumentando la ridondanza del codice correttore FEC e/o la robustezza della modulazione.

Nei collegamenti punto-punto, dove un singolo segnale è inviato ad un'unica stazione ricevente -per esempio a una SNG (*Satellite News Gathering*), l'ACM permette di proteggere i pacchetti di dati seguendo le variazioni della qualità del collegamento tra la postazione trasmittente e quella ricevente, valutata in termini del rapporto $C/(N + I)$ tra la potenza del segnale e quella del rumore e dei segnali interferenti sul canale satellitare. Analogamente sono impostabili

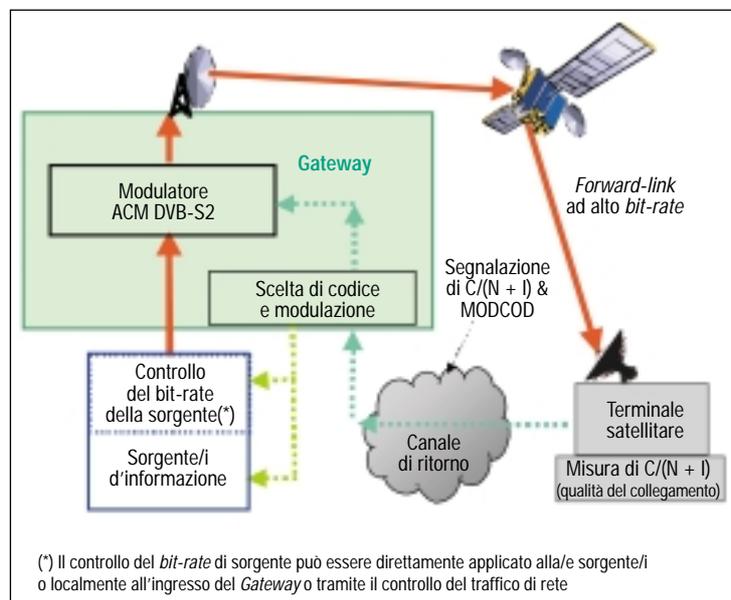


FIGURA 7

Diagramma a blocchi di un collegamento DVB-S2 in modalità ACM

⁸ I margini del rapporto segnale-rumore C/N non producono aumenti di qualità del servizio (*Quality of Service*: QoS,) per l'utente, poiché la ricezione QEF (*Quasi Error Free*) è garantita anche alla soglia del rapporto C/N , ma essi servono a garantire la ricezione del servizio anche in presenza di perturbazioni atmosferiche sul collegamento.

in modalità ACM i collegamenti *IP Unicast*, con la differenza che la configurazione di protezione dagli errori deve essere scelta per ognuno degli utenti del servizio, tenendo conto che il numero di utenti può essere molto ampio (anche di centinaia di migliaia). I servizi dati interattivi possono trarre vantaggio dall'uso del DVB-S2 grazie alla possibilità di avere una protezione dagli errori non uniforme mediante l'ACM e livelli di servizio differenziati, come priorità nelle code di consegna, *bit-rate* minimo garantito. In questo caso sono però necessarie strategie di allocazione delle risorse di rete tra i vari utenti, per evitare sovraccarichi o ritardi di trasmissione.

4.3. Lo standard DVB-H per la ricezione mobile portatile terrestre di segnali televisivi

4.3.1. GENERALITÀ SUL DVB-H

Negli ultimi anni il processo di convergenza tra servizi *broadcast* e *telecom* si sta espandendo con successo a tutti i settori delle telecomunicazioni, fisse e mobili, ed in modo particolare a quello dalla telefonia cellulare. L'avvento dei nuovi sistemi 2,5G/3G ha creato le basi per fare arrivare la TV all'utente sul telefonino, seppure i loro costi (insieme con altri problemi più di carattere tecnico, quali l'autonomia delle batterie, le dimensioni fisiche ed ergonomiche dei terminali, le dimensioni delle antenne, la protezione ai disturbi) per il momento frenino il successo del servizio.

Le reti cellulari, infatti, sono caratterizzate da un elevato numero di stazioni base con copertura su aree di piccole dimensioni, per garantire all'utente alte capacità di traffico personalizzato bidirezionale. Sono perciò intrinsecamente più costose (anche per un elevato costo delle licenze) delle reti di diffusione terrestri radiofoniche e televisive, che usano trasmettitori di potenza elevata per coprire aree di servizio vaste, potenzialmente suddividendo su un grande numero di utenti il costo della rete.

In quest'ottica, il DVB ha istituito un Gruppo *ad hoc*, denominato DVB-H (dall'inglese *Handheld*, portatile), per studiare la possibilità di utilizzare il DVB-T per fornire servizi radiotelevisivi su terminali mobili portatili. Il sistema DVB-T per la diffusione terrestre

della televisione digitale era stato concepito per la ricezione statica (fissa e portatile). I progetti europei *Motivate* [8, 9] prima, *MCP* e *Drive* successivamente, hanno poi dimostrato la possibilità di estendere la ricezione all'ambiente mobile, utilizzando modi di funzionamento molto robusti (come per esempio le modulazioni QPSK o 16 QAM ed i rapporti di codifica 1/2 o 2/3) del sistema. Unico neo per la ricezione su portatili è l'elevato consumo di potenza del ricevitore, fattore non critico per la ricezione fissa e mobile in auto, che rende il sistema non idoneo alla ricezione con terminali portatili con alimentazione a batteria. Ciò è dovuto alla complessità degli algoritmi di codifica video e di protezione del segnale, ma soprattutto al fatto che la trasmissione secondo lo standard DVB-T avviene in modo continuo ed il ricevitore DVB-T deve rimanere sempre attivo ed elaborare tutto il segnale ricevuto per poter estrarre il servizio richiesto dall'utente.

Bisogna tra l'altro tenere presente che il DVB-T si basa su MPEG-2 per la codifica video, essendo dedicato alla visualizzazione su schermi televisivi molto più grandi di quelli dei terminali portatili, troppo onerosa per la qualità richiesta ai servizi DVB-H. Il Gruppo ha pertanto prodotto uno standard [10] per la diffusione di servizi IP in formato compatibile con lo standard DVB-T per la ricezione portatile mobile, con i seguenti requisiti:

- minore consumo energetico rispetto al DVB-T per terminali alimentati a batteria;
- definizione di procedure di *hand-over*, per permettere all'utente di muoversi all'interno di una rete senza perdere la ricezione del servizio;
- flessibilità e scalabilità dei parametri del livello fisico del sistema, per ricezione nei vari ambienti (interni ed esterni agli edifici, urbano, rurale) ed a varie velocità (da pochi chilometri all'ora del pedone fino a centinaia di chilometri all'ora per i treni ad alta velocità);
- possibilità di utilizzare i sistemi più innovativi di codifica audio/video, descritti nel paragrafo 3.

4.3.2. ARCHITETTURA DI SISTEMA DVB-H

Con riferimento alla pila protocollare OSI di figura 8, il sistema DVB-H il cui schema è riportato in figura 9 è caratterizzato dall'intro-

duzione al livello di connessione (*link*) di:

- un codice correttore d'errore denominato MPE-FEC⁹ che rappresenta un livello di protezione aggiuntivo, di tipo Reed Solomon, sui dati in formato IP a livello MPE (*MultiProtocol Encapsulation*, standard EN 301 192);
- la **tecnica time slicing** – una suddivisione cioè

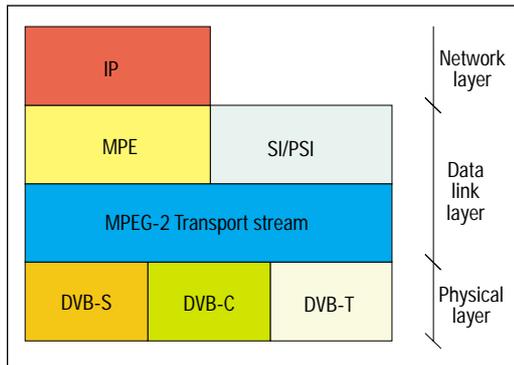


FIGURA 8
Pila protocollare OSI per la distribuzione di IP su DVB - livelli 1 ÷ 3

dell'asse dei tempi in intervalli assegnati in modo predefinito ai vari servizi, per permettere al terminale ricevente di spegnersi quando i dati trasmessi, non appartengono al servizio richiesto. Il DVB-H prevede inoltre, al livello fisico (*Physical Layer*), l'estensione opzionale dei modi di funzionamento del DVB-T con i seguenti elementi, propriamente definiti per il DVB-H:

- la segnalazione (con le portanti DVB-T dedicate alla segnalazione dei parametri di trasmissione), dei parametri DVB-H, tra cui l'identificativo di cella, per accelerare il rilevamento del servizio ed il processo di hand-over per i terminali in movimento;
- l'introduzione del nuovo modo di funzionamento 4K, compromesso fra le due soluzioni (2K e 8K) previste dal DVB-T, per migliorare la ricezione mobile;
- l'utilizzo dell'interallacciatore temporale (*time interleaving*) del modo 8K anche per i modi 2K e 4K, per aumentarne la tolleranza al rumore impulsivo.

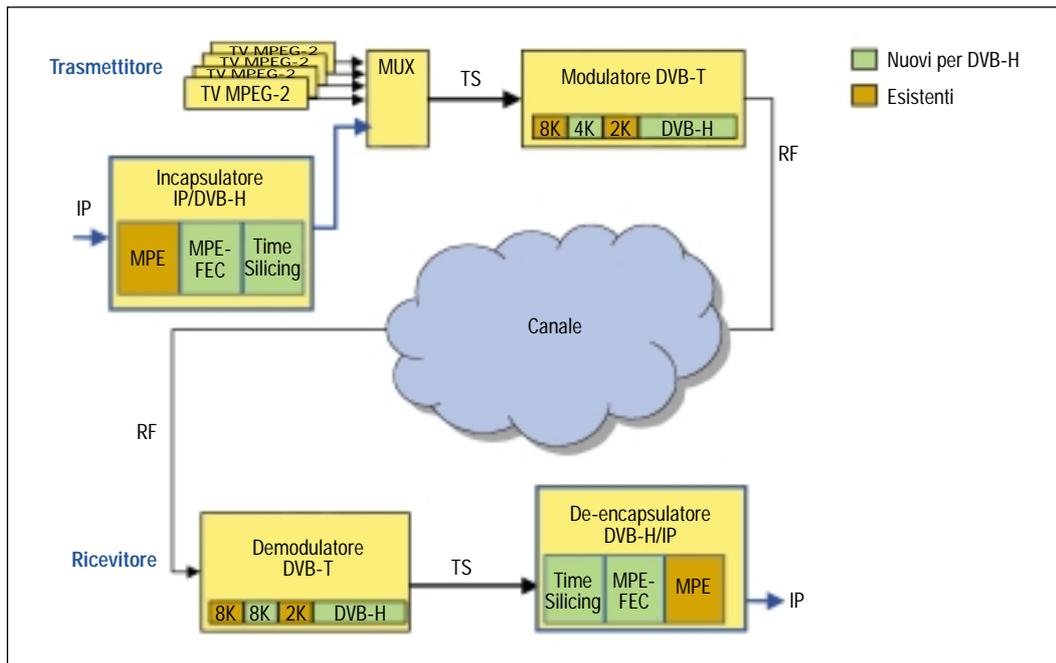
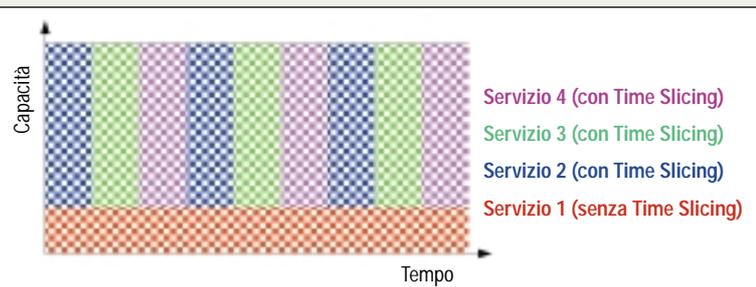


FIGURA 9
Schema a blocchi di principio del sistema DVB-H

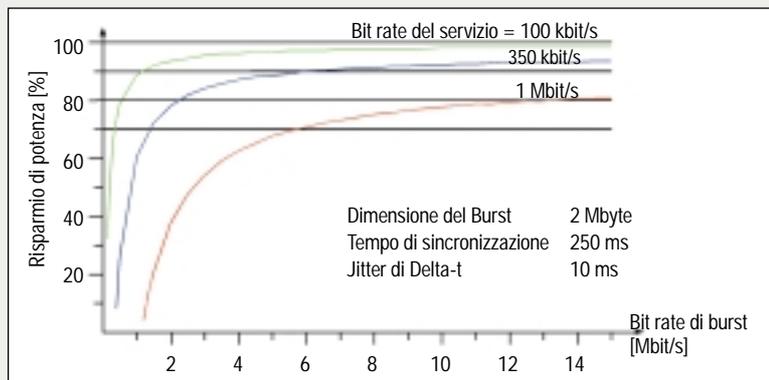
⁹ L'MPE-FEC (*MultiProtocol Encapsulation Forward Error Correction*) permette di migliorare le prestazioni del sistema DVB-T in ambiente mobile e di ridurre la sensibilità all'interferenza impulsiva. L'informazione di parità calcolata dal codice RS (255,191,64) sui datagrammi IP, viene trasmessa in sezioni separate denominate MPE-FEC, per poter essere ignorata dai ricevitori non in grado di decodificarla. Il codice ha un'efficienza del 75% ed è in grado di correggere fino a 64 byte errati su 255 ricevuti nella configurazione base; massima flessibilità è però lasciata agli operatori di *aumentarne o ridurne l'efficienza agendo sui bit di informazione o parità*. Maggiori informazioni sull'impiego di MPE-FEC nelle applicazioni broadcasting si trovano in [11, 12].

La **tecnica di time-slicing** (Figura A) consiste nella trasmissione dei dati relativi ad un servizio raggruppati a *burst*, con una velocità istantanea del flusso molto più elevata (anche di una decade) di quella media richiesta per trasmettere il servizio secondo i metodi tradizionali. All'interno del flusso dati viene segnalato al ricevitore l'intervallo di tempo Δt che intercorre prima dell'inizio del *burst* successivo. Nell'intervallo tra due *burst* successivi dello stesso servizio, la banda disponibile è utilizzata per altri servizi secondo lo stesso principio.

Contemporaneamente ai servizi, in *time-slicing* possono essere trasmessi anche servizi a flusso continuo. Il *time-slicing* permette al ricevitore di rimanere attivo per la sola frazione del tempo necessaria a ricevere i servizi richiesti (il trasmettitore è invece sempre attivo, essendo la trasmissione continua). L'assorbimento di potenza dipende dal *bit-rate* medio del servizio e dal *bit-rate* di picco e può essere ridotto anche del 90% rispetto ad un ricevitore tradizionale (Figura B).



A Allocations temporale dei servizi nei sistemi DVB-T e DVB-H



B Risparmio percentuale di potenza offerto dalla funzione di time-slicing del DVB-H

MPE-FEC e *time-slicing* agiscono ai livelli OSI 2 e 3, e quindi non modificano lo standard DVB-T, permettendo ai ricevitori DVB-T tradizionali di interpretare correttamente il segnale, semplicemente ignorando la segnalazione DVB-H. Questo funzionamento va naturalmente a scapito di una perdita di efficienza trasmissiva, dell'ordine del 25%, variabile a seconda della configurazione DVB-H. Il modo 4K non può invece essere usato, se si vuole mantenere la compatibilità con il DVB-T.

4.3.3. CONFIGURAZIONI DI RETE DEL SISTEMA DVB-H

Lo standard prevede tre diverse tipologie di configurazione di rete (Figura 10):

a. l'intero multiplex può essere dedicato alla trasmissione secondo lo standard DVB-H: in assenza di vincoli di compatibilità con i ricevitori DVB-T, possono essere utilizzate anche le opzioni del DVB-H che modificano lo standard DVB-T (per esempio, modo 4K);

b. il multiplex può essere condiviso tra servizi DVB-T e DVB-H, assegnando una banda complessiva costante al flusso DVB-H: per mantenere la compatibilità con i ricevitori attuali le funzioni DVB-H che modificano il livello fisico DVB-T non possono essere utilizzate;

c. sullo stesso canale a radio frequenza può essere trasmessa una modulazione gerarchica¹⁰, con servizi DVB-H sul flusso ad alta priorità (per la ricezione mobile è richiesta maggiore robustezza) e DVB-T sul flusso a bassa priorità (con maggiore disponibilità di banda). Anche in questo caso il livello fisico DVB-T non può essere modificato.

Le coperture del DVB-H nel caso di multiplex dedicato sono paragonabili a quelle ottenibili con il sistema di radiofonia digitale DAB (*Digital Audio Broadcasting*) - anche se potrebbero essere necessari 2-3 dB di potenza in più - ma il numero dei programmi audio a parità di banda può essere quasi raddoppiato (essa ri-

¹⁰ La modulazione gerarchica, così come prevista dallo standard DVB-T, è effettuata suddividendo il flusso di informazione, prima della mappatura dei bit sulle costellazioni bidimensionali, in due rami, l'uno ad alta priorità, l'altro a bassa priorità. I bit sul ramo ad alta priorità, che devono essere maggiormente protetti, scelgono il quadrante, quelli a bassa priorità discriminano i punti all'interno del quadrante.

sulta da sei a otto volte maggiore¹¹ per un'occupazione di banda quattro volte superiore). Nei due casi di multiplex dedicato o condiviso poi, le coperture DVB-T e DVB-H sono molto disomogenee. Il DVB-T è pianificato per offrire una copertura fissa garantendo buona qualità di ricezione con trasmissioni a *bit rate* elevati (per esempio 24 Mbit/s con raggio di copertura di circa 38-53 km per potenza di trasmissione ERP pari ad 1 kW). Per garantire la copertura DVB-H mobile bisogna invece utilizzare modi trasmissivi più robusti, riducendo così drasticamente il *bit rate* (si può per esempio pianificare la copertura a 12 Mbit/s, con una rete molto più densamente occupata, costituita da più del triplo di trasmettitori, oppure con un incremento di ERP di 13 dB).

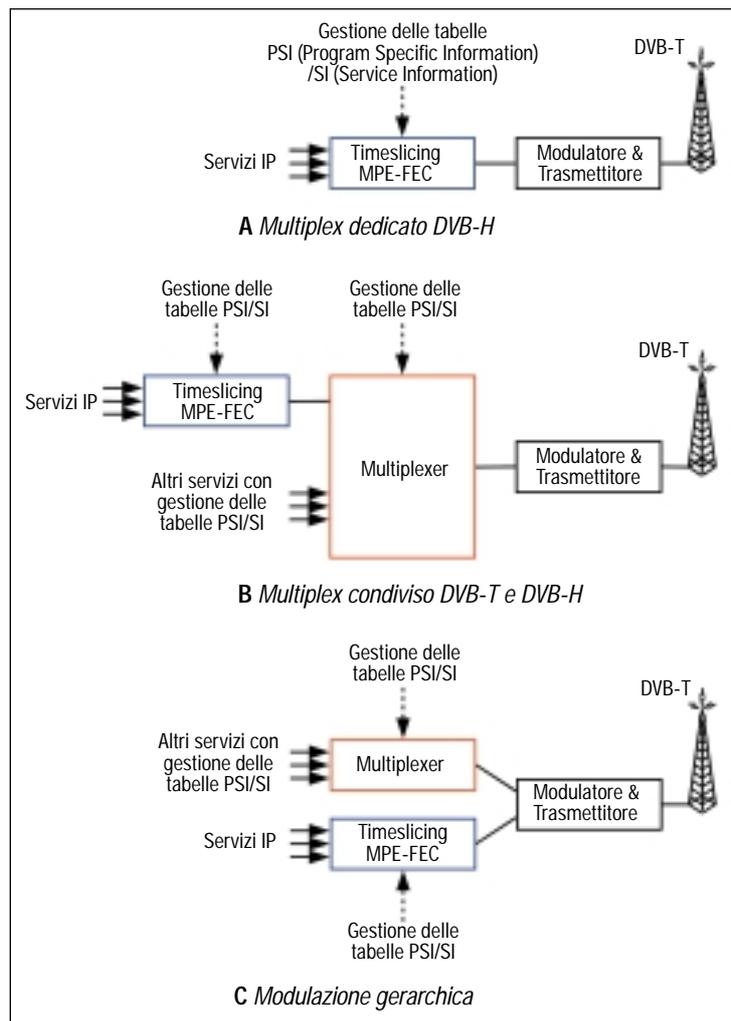
Con le modulazioni gerarchiche è possibile bilanciare parzialmente le coperture DVB-T e DVB-H; tuttavia per una copertura mobile continua, occorre un numero di trasmettitori da tre a cinque volte maggiore rispetto alla copertura DVB-T utilizzata per la ricezione fissa (con una riduzione del *bit rate* totale del multiplex da 24 a 20,5 Mbit/s).

5. CONCLUSIONI

Nonostante gli enormi progressi fatti dalla televisione dall'avvento del digitale fino ai giorni nostri, non si può affatto affermare che il processo innovativo si sia arrestato. Al contrario, nuovi scenari si sono aperti con l'affermazione del digitale e con la spinta della convergenza tra il mondo *telecom* e quello *broadcast*, offrendo la possibilità di offrire nuovi servizi agli utenti. I nuovi sistemi di codifica video e di trasmissione vanno in questa direzione.

Tuttavia la migrazione dai sistemi di diffusione attuali a quelli più avanzati non è esente da problemi: ad esempio il consorzio DVB non prevede una sostituzione a breve termine del DVB-S con il DVB-S2, e dell'MPEG-2 con l'H.264, in quanto operano con successo milioni di decodificatori in tutto il mondo con tecnologia tradizionale, ai quali gli operatori della radiodiffusione devono garantire la continuità del servizio.

¹¹ Da notare che un'eccessiva capacità del multiplex può essere un problema per le emittenti locali.



La diffusione del DVB-S2 e dell'H.264 potrà invece riguardare servizi completamente nuovi non forniti dagli attuali ricevitori: la televisione ad alta definizione, il video su IP su canali limitati in banda ed i nuovi servizi che utilizzano l'Internet veloce.

Per fare previsioni relative all'introduzione del DVB-H bisogna tenere presente lo scenario attuale della televisione terrestre in Italia, dove i *broadcaster* sono già impegnati nell'introduzione del sistema digitale DVB-T, superando le difficoltà della scarsità di frequenze disponibili per il servizio. Quando questo processo sarà giunto a maturazione e cominceranno a essere spente le connessioni con *frequenze analogiche*, si apriranno migliori prospettive per il loro riutilizzo per i servizi mobili tipo DVB-H, e si sfrutteranno le sinergie con i sistemi di telefonia mobile avanzati.

FIGURA 10
Configurazioni di rete DVB-H

Bibliografia

- [1] Information Technology-Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information: Video. JTC 1/SC 29; ISO/IEC 13818-2:2000, p. 208, <http://www.iso.org/iso/en/prods-services/ISOstore/store.html>
- [2] Cominetti M., Morello A.: Il sistema europeo (DVB) per la diffusione televisiva da satellite. *Elettronica e Telecomunicazioni*, Anno XLIII, n. 3, 1994.
- [3] Mignone V., Morello A., Visintin M.: Lo standard DVB-T per la televisione digitale terrestre. *Elettronica e Telecomunicazioni*, Anno LI, n. 1, aprile 2002, <http://www.crit.rai.it/eletel/2002-1/21-4.pdf>
- [4] Schäfer R., Wiegand T., Schwarz H.: The emerging H264/AVC standard. *EBU Technical Review*, January 2003, http://www.ebu.ch/trev_293-contents.html
- [5] List P., Joch A., Lainema J., Bjontegaard G., Karczewicz M.: Adaptive Deblocking Filter. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 13, n. 7, July 2003.
- [6] Ribas-Corbera J.: Windows Media 9 Series — a platform to deliver compressed audio and video for Internet and broadcast applications. *EBU Technical Review*, January 2003, <http://www.ebu.ch/trev293-contents.html>
- [7] Morello A., Mignone V.: Il sistema DVB-S2 di seconda generazione per la trasmissione via satellite e Unicast. *Elettronica e Telecomunicazioni*, Anno LII, n. 3, dicembre 2003, <http://www.crit.rai.it/eletel/2003-3/33-1.pdf>
- [8] Bertella A., Rossini M., Sunna P., Vignaroli L.: *Mobile DVB-T reception: quality of streaming over IP of audiovisual services*. IBC'02 Conference Amsterdam, 11-15 September 2002, <http://www.broadcastpapers.com/tvtran/IBCRAIMobileDVB-To1.htm>
- [9] Pogrzeba P., Burow R., Faria G., Oliphant A.: *Lab & Field tests of mobile applications of DVB-T*. Montreux Symposium '99 Records, June 1999, p. 649-656, <http://www.broadcastpapers.com/tvtran/DVBLab&FieldTestsMobile%20-%20print.htm>
- [10] *DVB Transmission system for handheld terminals*. DVB Document Ao81, June 2004, <http://www.dvb.org/documents/white-papers/ao81.dEN302304.sb1333.tm3037.tmho202r4.pdf>
- [11] http://www.digitalradiotech.co.uk/fec_coding.htm
- [12] Henriksson J., Talmola P.: Coach potato (Television on mobile home). *IEE Communications Engineer*, June 2004.

ALBERTO MORELLO si è laureato in Ingegneria Elettronica al Politecnico di Torino nel 1982 e ha ottenuto il titolo di "Dottore di Ricerca in Telecomunicazioni" nel 1987.

Dal 1999 è Direttore del Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della RAI di Torino. Dal 1984 si occupa di trasmissioni digitali dei segnali radio-televisivi e multimediali su canali via satellite, via cavo e via etere. È stato presidente di importanti gruppi tecnici che hanno definito gli standard DVB-S, DVB-DSNG e DVB-S2 e contribuisce regolarmente a riviste tecniche internazionali e congressi.
a.morello@rai.it

PAOLA SUNNA consegue la laurea in Ingegneria Elettronica nel 1997 presso il Politecnico di Torino discutendo una tesi sulla valutazione oggettiva della qualità di segnali video compressi con MPEG-2. Dal 1997 lavora al Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica, svolgendo test per la valutazione della qualità del segnale video nell'ambito di applicazioni broadcasting, webcasting e 3G. Dal 2002 presiede il gruppo EBU B-VIM (Video in Multimedia) che ha eseguito una campagna di test per la misurazione delle prestazioni di codificatori per applicazioni multimediali.
p.sunna@rai.it

VITTORIA MIGNONE si è laureata in Ingegneria Elettronica presso il Politecnico di Torino nel 1990. Nel 1991, in collaborazione con il dipartimento di Ingegneria Elettronica del Politecnico di Torino, ha effettuato studi sulla trasmissione via satellite commissionati dal Consiglio Nazionale delle Ricerche. Dal 1992 lavora presso il Centro Ricerche RAI, dove ha collaborato agli studi per la definizione dei sistemi europei DVB per la trasmissione di televisione digitale via satellite, via cavo, terrestre, e per servizi di tipo DSNG (*Digital Satellite News Gathering*) e di contributo.
v.mignone@rai.it