

Compressione di immagini in applicazioni spaziali: lo standard CCSDS 122.0-B-1

CCSDS (Consultative Committee for Space Data System) – comitato nato nel 1982 a opera delle principali agenzie spaziali con lo scopo di definire raccomandazioni per la realizzazione delle architetture di data handling per applicazioni a bordo di satelliti – ha definitivamente standardizzato nel 2003 un algoritmo – indicato con la sigla CCSDS 122.0-B-1 – per la compressione di immagini nel settore spaziale

Mariano Severi



Come nella maggior parte delle applicazioni commerciali, anche in ambito spaziale uno dei settori di maggiore interesse è rappresentato dallo sviluppo dei sistemi di compressione dati. La definizione di requisiti di missione sempre più stringenti da un punto di vista scientifico e tecnologico, infatti, implica una costante crescita della quantità di informazione che è necessario gestire. Tuttavia, la capacità di trasmissione

dati, ottenibile anche con le più recenti tecniche di modulazione, risulta inadeguata e la capacità di memorizzazione a bordo è limitata da considerazioni relative alla affidabilità dei dispositivi di memoria impiegabili e alla dissipazione di potenza del sistema.

La realizzazione di apparati di compressione dati per applicazioni spaziali si basa su alcuni requisiti peculiari:

- la capacità dell'algoritmo di adattarsi a variazioni della

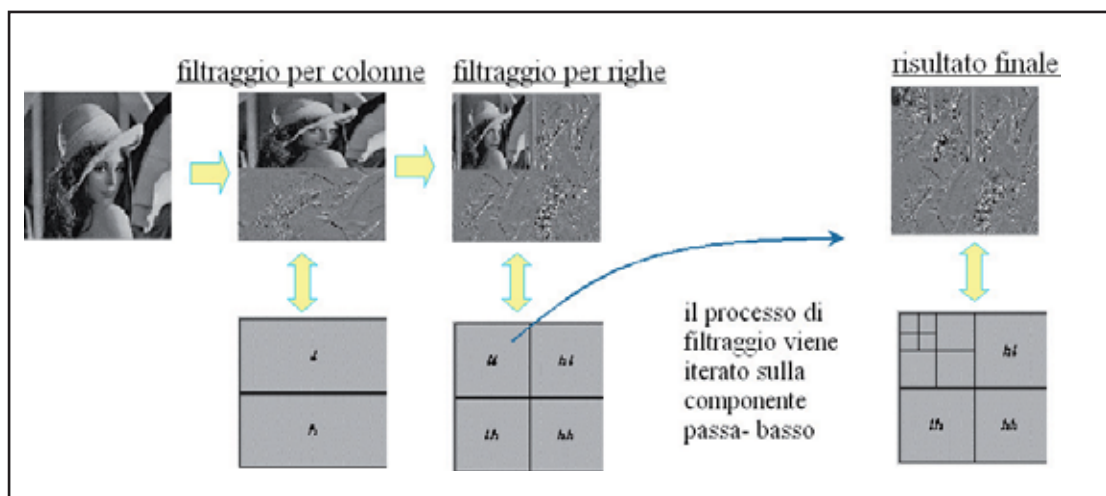


Fig. 1 - Decomposizione dell'immagine in sotto-bande mediante DWT

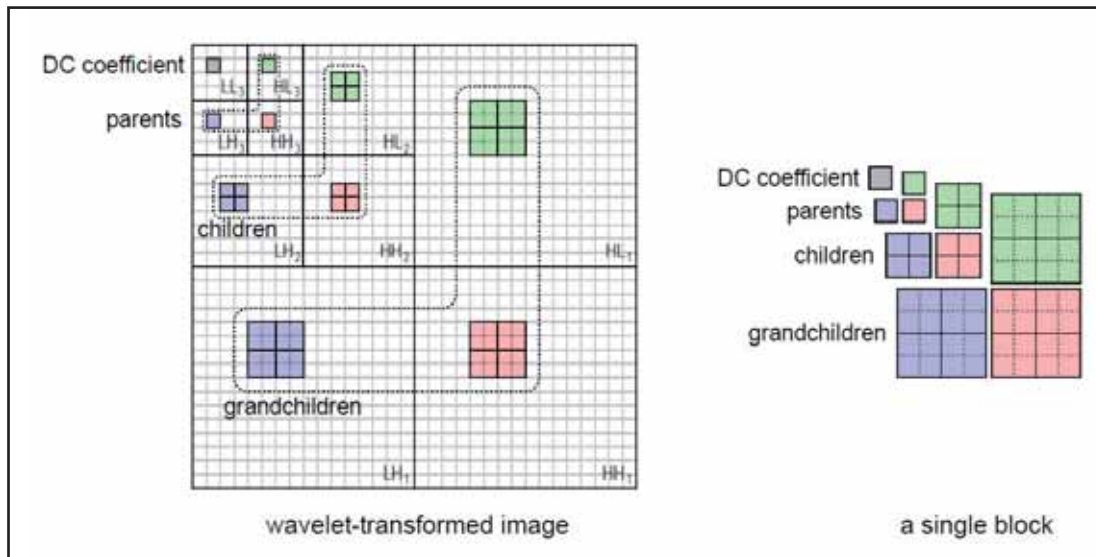


Fig. 2 - La definizione dei blocchi nell'immagine trasformata (da [3])

distribuzione statistica dell'informazione ottimizzando in ogni caso le prestazioni;

- la capacità di ridurre il numero di passi nell'elaborazione dei dati minimizzando occupazione di memoria e dissipazione di potenza;
- la capacità di ridurre la distorsione del segnale ricostruito come conseguenza di inevitabili errori di canale nella trasmissione dei dati compressi a terra;
- la capacità di supportare formati di immagini frame-based (acquisizione simultanea dell'intera matrice, come nel caso di camere CCD) e strip-based (acquisizione di una linea per volta, come per i sensori push-broom).

Gli standard definiti in ambito commerciale tipicamente non sono in grado di soddisfare appieno tali requisiti. JPEG2000, ad esempio, deriva la maggior parte delle sue peculiarità dall'adozione di uno schema di codifica entropica block-based e di un algoritmo di ottimizzazione rate-allocation che richiedono una complessità computazionale non compatibile con le risorse delle apparecchiature di bordo.

Il CCSDS (Consultative Committee for Space Data System) – comitato nato nel 1982 a opera delle principali agenzie spaziali con lo scopo di definire raccomandazioni per la realizzazione delle architetture di data handling per applicazioni a bordo di satelliti – sulla base dei requisiti sopra elencati ha definitivamente standardizzato nel 2003 un algoritmo – indicato con la sigla CCSDS 122.0-B-1 – per la compressione di immagini nel settore spaziale.

Oltre alle linee guida tracciate in precedenza, la definizione

dell'algoritmo è stata orientata pensando a una implementazione hardware in grado di supportare immagini con risoluzione del valore del pixel fino a 16 bit e capace di comprimere in tempo reale un flusso dati fino a 20 Msample/s con una dissipazione di potenza inferiore a 1 W/Msample/s (prendendo come riferimento lo stato dell'arte dell'industria micro-elettronica per il settore spaziale nell'anno 2000).

Trasformata wavelet per decorrelare l'informazione

L'algoritmo CCSDS 122.0-B-1 supporta immagini in bianco e nero con dimensione di riga compresa tra 17 e 220 pixel. È in grado di operare in modalità con (lossy) e senza (loss-less) perdita. In applicazioni senza perdita l'immagine ricostruita è identica a quella acquisita; la compressione deriva semplicemente da una eliminazione della ridondanza intrinseca dell'informazione. In applicazione con perdita, invece, l'immagine ricostruita differisce da quella acquisita a un livello di dettaglio che dipende dal fattore di compressione applicato.

L'algoritmo CCSDS 122.0-B-1 è basato su trasformata Wavelet discreta (Discrete Wavelet Transform). In compressione lossy (soprattutto per elevati fattori di compressione) adotta il filtro Daubechies 9/7 con aritmetica a virgola mobile, impiegato anche all'interno dello standard JPEG2000. In compressione loss-less impiega invece l'approssimazione non lineare 9/7M a interi che garantisce migliori prestazioni in termini di fattore di compressione raggiunto rispetto al filtro Daubechies 5/3 selezionato in JPEG2000; l'adozione di

Un ASIC in tecnologia rad-tolerant

L'ESA ha recentemente finanziato un programma di ricerca e sviluppo (ESA contract n°22011/08/NLL/LvH) per la realizzazione di un ASIC in tecnologia tollerante alle radiazioni che implementi l'algoritmo di compressione di immagini CCSDS 122.0-B-1. Il progetto sarà realizzato grazie a una collaborazione tra EADS Astrium, gruppo leader in Europa nel settore dei servizi per la difesa e l'aerospazio, e Techno-System Developments, azienda italiana specializzata nella progettazione e realizzazione di apparecchiature elettroniche per lo spazio.

CWICOM (CCSDS Wavelet Image Compression Module) - questo il nome del dispositivo - sarà in grado di comprimere un flusso dati in ingresso fino a 60 Megapixel/s con risoluzione di 16 bit per pixel e dissipazione di potenza massima (stimata) di 100 mW/MHz. In modalità frame-based supporta immagini di dimensioni fino a 3000 x 16384; include funzionalità di equalizzazione (correzione non uniforme) per sensori CCD con coefficienti programmabili. Dispone di interfacce di comunicazione parallele, porta di controllo SPI e due controller di nodo Space-Wire. Il dispositivo sarà realizzato nella tecnologia Atmel ATC18 CMOS Rad-tolerant Sea of Gate (180 nm) che assicura immunità da latch-up fino a dose totale di radiazione assorbita di 300 kRad e tolleranza ai SEU.

I prototipi dovrebbero essere disponibili nella seconda metà del 2010; tra le prime missioni candidate a impiegare il dispositivo è stata annoverata Sentinel-2, satellite per osservazione terrestre che entrerà nel programma europeo GMES.

Il progetto dell'ASIC sarà corredato dalla realizzazione di un modello software bit-accurato del dispositivo e di un sistema di sviluppo che, nella prima fase, permetterà dapprima il prototyping del codice HDL su logiche programmabile e poi la validazione del dispositivo. In seguito, il sistema potrà servire come piattaforma di valutazione delle prestazioni e funzionalità dell'ASIC.

un filtro a interi assicura la reversibilità della trasformata e quindi la possibilità di lavorare con compressione senza perdita. Il filtro 9/7M può anche essere applicato per compressioni con perdita a bassi fattori di compressione dove, pur mostrando una complessità computazionale confrontabile con quella della trasformata 5/3, garantisce un migliore rapporto segnale/rumore per l'immagine ricostruita.

Esiste una implementazione della trasformata 9/7M mediante lifting scheme che impiega un solo passo di lifting (ovvero una sequenza prediction/update) che richiede 1 moltiplicazione, 2 operazioni di shift e 8 addizioni.

Come in tutti i metodi di compressione basati su DWT, la trasformata bidimensionale dell'immagine è realizzata applicando il filtro prima per righe e quindi per colonne. A ogni passo il filtro isola per ogni riga (o colonna) le due componenti passa-basso (L) e passa-alto (H). L'immagine viene così decomposta nelle quattro componenti LL, LH, HL e HH; LL, ad esempio, indica la componente passa-basso sia per righe sia per colonne. Lo schema di filtraggio viene quindi iterato su tale componente (Fig. 1). Il numero di iterazioni applicate determina la capacità dell'algoritmo di risolvere la correlazione tra le diverse sotto-bande dell'immagine trasformata e quindi, in definitiva, le prestazioni in termini di rapporto segnale/rumore ottenibile nell'immagine ricostruita a parità di fattore di compressione. Incrementare il numero di iterazioni incrementa tuttavia la complessità computazionale dell'algoritmo e le richieste in termini di capacità di memoria. Prove empiriche su immagini di riferimento mostrano che nel passare da 3 a 4 livelli di trasformata si ottiene un guadagno sul PSNR di 0.5 db; passando da 3 a 5, invece, tale guadagno si incrementa di 0.63 db. Lo standard CCSDS 122.0-B-1 raccomanda l'applicazione di 3 livelli di filtraggio per la trasformata dell'immagine, privilegiando in questo modo la minore complessità computazionale dell'algoritmo e riducendo il degrado dell'immagine nel caso di errori nella trasmissione della sequenza di dati compressi.

Bit-plane encoding per quantizzare i coefficienti trasformati

L'immagine trasformata mediante DWT viene successivamente quantizzata mediante Bit-Plane-Encoder. Per ridurre, fissato il fattore di compressione, l'errore quadratico medio nell'immagine ricostruita, introdotto dalla quantizzazione, nel caso di trasformata a interi sono applicati ai coefficienti dei fattori di scala.

Il valore di tali pesi può essere derivato analiticamente sotto certe ipotesi (linearità della trasformata e distribuzione uniforme dell'errore di quantizzazione) che tuttavia sono solamente approssimate nella realtà; i valori definiti all'interno dello standard, per questo, sono stati stimati mediante

prove empiriche sulle diverse immagini campione. I coefficienti trasformati (ed eventualmente scalati) sono organizzati in blocchi di 64 valori che comprendono, come mostrato in figura 2, un coefficiente DC e i relativi coefficienti AC associati alle sotto-bande a più alta frequenza nello spettro; un segmento è quindi definito come un insieme di S blocchi. Con il termine bit-plane si indica l'insieme dei valori dei bit di medesimo peso dei coefficienti trasformati contenuti in segmento.

La definizione dei segmenti è in qualche modo simile alla decomposizione dell'immagine in sotto-regioni (tile), ognuna compressa indipendentemente dalle altre, che in alcuni algoritmi viene fatta per ridurre la complessità computazionale e la richiesta di risorse.

Il segmento si riferisce tuttavia a pixel non contigui dell'immagine. Pertanto, mentre un errore nella trasmissione dei dati compressi di un tile comporta la perdita di un'area dell'immagine, lo stesso errore in un segmento provoca la corruzione di pixel sparsi nell'immagine con il risultato di un degrado complessivo della qualità di questa.

Nello standard CCSDS 122.0-B-1 l'immagine è codificata segmento dopo segmento ma la compressione di ognuno di questi può procedere parallelamente. Un header di lunghezza

variabile compresa tra 3 e 20 consente di definire informazioni accessorie che riguardano il particolare segmento che segue e le opzioni di codifica adottate. I coefficienti DC sono inizialmente quantizzati con un fattore di quantizzazione q configurabile e direttamente legato all'intervallo dinamico degli stessi coefficienti DC e di quelli AC; le differenze tra i coefficienti contigui così quantizzati sono quindi compresse secondo uno schema predittivo. Infine sono codificati i diversi bit-plane per tutti i coefficienti; chiaramente nel caso dei coefficienti DC non sono considerati i bit-plane di indice maggiore del livello di livello di quantizzazione adottato. Il BPE procede attraverso 4 stadi.

Nel primo stadio viene emesso semplicemente il bit del coefficiente DC nel bit-plane considerato (se significativo, secondo quanto appena discusso). I coefficienti AC sono invece codificati nei passi da 1 a 3 confrontando il valore del bit con una soglia dettata dal bit-plane considerato; la sequenza di simboli con cui sono codificati i diversi bit in ogni bit-plane è quindi compressa mediante encoder entropico. Per i dettagli sull'associazione tra simboli e bit del bit-plane e sui parametri della successiva codifica si rimanda il lettore alla consultazione dello standard [1].

La compressione dell'immagine può essere arrestata in qual-

DIAMONDS in the ROUGH

Rugged - Compatta - Precisa - Affidabile

Nella progettazione di sistemi embedded sono richieste acquisizione dati, connettività e range di alimentazione completo.

Diamond Systems ha quanto serve. Diamond Systems è infatti leader mondiale nella fornitura di moduli di I/O PC104 e di schede CPU ad elevata integrazione nei formati PC104, Epic, ETX ed EBX, dove viene integrata una sezione di acquisizione dati.

Diamond Systems progetta inoltre su richiesta delle schede che possano soddisfare esigenze specifiche, approntando modifiche a soluzioni già esistenti oppure sviluppando un prodotto completamente nuovo.



Sistemi Avanzati Elettronici®
soluzioni per durare nel tempo



La soluzione ETX pronta all'uso, con espansione PC104+

Pluto: CPU, baseboard e cooling plate integrate, in formato ETX

- Schede CPU con processori Atom e Core Duo di Intel
- Con baseboard in formato ETX inclusa
- Totalmente fanless
- Fino a 2GB di RAM, 4 porte USB e 4 porte seriali
- Doppia ethernet 10/100
- Interfaccia SATA, IDE e slot per CF
- CRT, LVDS e TV out
- Espansione PC104+
- Range di temperature operative a partire da -20 +70°C

readerservice.it n.24563

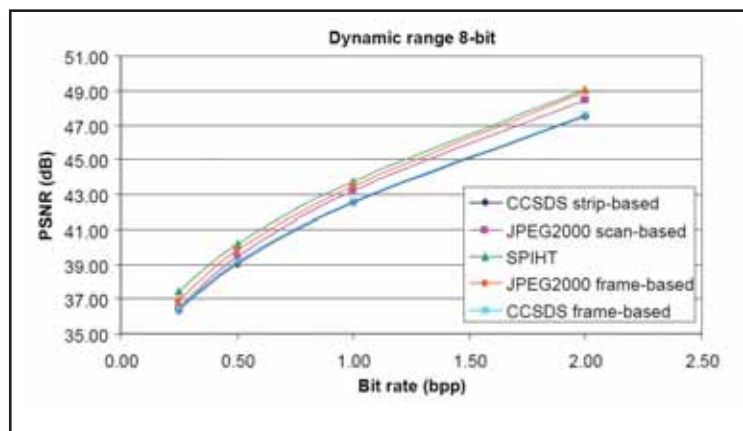


Fig. 3 - Andamento del PSNR medio calcolato su immagini campioni in funzione del fattore di compressione per i diversi algoritmi (da [3])

siasi istante, ad esempio quando il numero di byte emessi è uguale al valore pre-definito oppure quando la qualità dell'immagine ricostruibile dallo stream codificato soddisfa i requisiti. La prima modalità corrisponde a un funzionamento a bit-rate costante per immagine, che non è presente nella maggior parte degli standard commerciali, ma che è importante in applicazioni spaziali dove tipicamente la banda di canale allocata è fissata e limitata.

Nel secondo caso, invece, la qualità dell'immagine ricostruita viene stimata indirettamente in funzione del numero di coefficienti trasformati che sono stati codificati nella sequenza compressa; l'algoritmo controlla tale parametro che deve quindi essere correttamente configurato dall'utente su base empirica considerando immagini campione.

Prestazioni a confronto

L'algoritmo CCSDS 122.0-B-1 è stato confrontato con i principali metodi e standard attualmente disponibili al fine di valutarne prestazioni e caratteristiche per quanto concerne applicazioni spaziali. Tra gli algoritmi considerati nel confronto sono stati inclusi JPEG2000 JPEG-LS, CCSDS RICE, SPIHT e ICER; quest'ultimo, in particolare, è già stato utilizzato in una implementazione software a bordo della missione Mars Ex-

ploration Rover (MER). La tabella 1 riporta i fattori di compressione (espressi come numero di bit-per pixel dell'immagine compressa) che in media possono essere raggiunti con ogni algoritmo in compressione senza perdita; le prestazioni sono state valutate su una serie di immagini campione di vario tipo legate all'osservazione terrestre e di stelle e pianeti. In modalità frame-based ICER mostra in assoluto le migliori prestazioni con 3.53 e 4.46 bit per pixel in media su immagini a 8 e 10 bit grazie all'adozione di una trasformata a interi 2/6 e a quattro livelli di decomposizione dell'immagine; l'implementazione corrente supporta tuttavia solo tale compressione di tipo frame-based. In modalità strip-based, invece, le prestazioni migliori si ottengono con JPEG-LS (che implementa un algoritmo predittivo per compressione senza perdita) mentre quelle peggiori con il CCSDS Rice (che, non essendo pensato espressamente per applicazioni su immagini, non è in grado di decorrelare l'informazione sulle due dimensioni). Soltanto gli standard CCSDS 122.0-B-1 e JPEG2000 supportano adeguatamente le modalità frame-based e strip-based con prestazioni leggermente migliori quasi ovunque (tranne nel caso di immagini a 16 bit) per JPEG2000 a costo, però, di una maggiore complessità.

La figura 3 mostra invece l'andamento dei parametri PSNR e

TABELLA 1 - FATTORE DI COMPRESSIONE MEDIO CALCOLATO SU IMMAGINI CAMPIONE PER I DIVERSI ALGORITMI IN COMPRESSIONE LOSS-LESS (DA [3])

Numero di bit per pixel	Numero di bit per pixel nell'immagine compressa							
	Compressione strip-based				Compressione frame-based			
	CCSDS 122.0-B-1	CCSDS Rice	JPEG-LS	JPEG2000 122.0-B-1	CCSDS	JPEG2000	SPIHT	ICER
8	3,82	4,09	3,54	3,67	3,82	3,61	3,59	3,53
10	4,69	5,36	4,47	4,62	4,69	4,57	4,54	4,46
12	5,72	6,28	5,58	5,63	5,72	5,60	-	5,42
16	11,07	11,47	11,06	11,29	11,07	11,25	-	10,86

- : non disponibile nella implementazione software di riferimento

HARDWARE

IMAGE COMPRESSION

MAE calcolati sullo stesso insieme di immagini campioni a 8 a diversi fattori di compressione nel caso di compressione con perdita. Gli algoritmi SPIHT e JPEG-2000 frame-based offrono le migliori prestazioni sebbene, ancora una volta, a scapito di una maggiore complessità computazionale e soprattutto di una maggiore richiesta di capacità di memoria. Il CCSDS offre tipicamente migliori prestazioni (di circa 1 db) nella modalità frame-based rispetto a quella strip-based; in questo caso la differenza con quanto ottenuto con JPEG2000 è tipicamente inferiore a 1 db, ed è ragionevole ritenere che si riduca ulteriormente quando si impongano le restrizioni per la particolare implementazione di JPEG2000 (ad esempio limitazioni nella dimensione del tile, semplificazione della procedure di ottimizzazione della curva rate-distorsione e così via).

Rispetto a tale standard, il CCSDS 122.0-B-1 soffre inoltre dell'assenza di una serie di funzionalità. Tra queste si possono ricordare, ad esempio, le possibilità di: definire in JPEG2000 regioni di interesse all'interno dell'immagine che possano essere codificate con migliore risoluzione; organizzare i dati compressi in modo che la risoluzione dell'immagine e non solo la distorsione complessiva migliorino progressivamente in funzione del numero di byte compressi decodificati; gestire immagini a colori e non soltanto in bianco e nero; estendere il grado di parallelismo della implementazione hardware su singoli blocchi di dimensioni inferiori al segmento definito nella specifica CCSDS; utilizzare uno schema di controllo lagrangiano della distorsione dell'immagine che migliora la qualità a elevati fattori di compressione.

In questo senso, è piuttosto evidente, come accennato in precedenza, che l'approccio seguito dal comitato CCSDS nella definizione del proprio standard di compressione di immagini è stato in effetti quello di prevedere le sole funzioni essenziali al fine di ridurre la complessità computazionale dell'algoritmo e della sua implementazione pur cercando di ottenere prestazioni simili nei campi di applicazione di interesse.

[1] www.ccsds.org

[2] "Image Data Compression - Recommended Standard" - CCSDS 122.0-B-1 Blue Book

[3] "Image Data Compression - Informational Report" - CCSDS 120.1-G-1 Green Book



TPole

Quality in details



Single Board Computers



PC/104, EBX,
3.5", 5.25",
mini-ITX, Slot-PC,
ATX motherboard,
ETX, Com Express

Mini PC



Industrial PC



Panel PC



Industrial Monitor



**Produzione e fornitura di soluzioni
embedded**

Supporto sistemi operativi

Windows XP embedded - Windows CE - Linux



www.tpole.it

readerservice.it n.23133