

QI2S - Sistema per l'elaborazione ed interpretazione di immagini iperspettrali direttamente a bordo del satellite

Giovanna Ober (*), Jamin Naghmouchi (**), Ole Bischoff (***), Peleg Aviely (****), Ron Nadler (*****), David Guiser (*****), Valerio Messina (*), Riccardo Freddi (*)

(*) CGS Spa Compagnia Generale per lo Spazio, Via Gallarate 150, 20151, Milano, Italy
 (**) Technische Universität Braunschweig, Pockelsstrasse 14, Braunschweig, 38106, Germany
 (***) DSI GmbH, Otto-Lilienthal-Strasse 1, Bremen, 28199, Germany
 (****) Ramon Chips Ltd, 5 HaCarmel Street, Yokneam, 2069201, Israel
 (*****) Elbit Systems Electrooptics – ELOP Ltd., Hamada 5, Rehovot, 76111, Israel

Sommario

Le future missioni di osservazione della terra e di esplorazione planetaria richiederanno grandi capacità di gestione dati e calcolo in tempo reale per soddisfare le crescenti richieste di elaborazione immagini e di segnali. QI2S è un progetto finanziato nell'ambito del programma di ricerca europeo FP7 che ha percorso un passo in avanti in questa direzione, sviluppando il prototipo di una piattaforma leggera per il processing *on-board* a basso consumo e con una tecnologia *manycore* per l'elaborazione massiva in parallelo (basata sull'architettura RC64 di Ramon Chips "ITAR free" in grado, in futuro, di raggiungere performance nell'ordine di centinaia di GOPS e decine di GFLOPS, ma implementata con una FPGA a prestazioni ridotte a fini dimostrativi). La piattaforma hardware viene dimostrata per l'analisi *on-board* di dati iperspettrali in tempo reale, con un'efficienza energetica di 15 GOPS/Watt o 2 GFLOPS/Watt. Le missioni iperspettrali per l'Osservazione della Terra (OT) acquisiscono migliaia di dati in un elevato numero di bande spettrali, generando flussi dati di grandi dimensioni. L'elaborazione a bordo di questi dati richiede un'elevata potenza di calcolo ed in QI2S è stata sviluppata una catena di processing che – a partire dalla correzione radiometrica per distorsioni ed artefatti, calibrazione radiometrica, correzione atmosferica, mascheramento delle nuvole – porta all'identificazione e riconoscimento di specifici materiali o oggetti. QI2S è stato sviluppato per garantire alte prestazioni di calcolo in parallelo e un'architettura facilmente riconfigurabile, dimostrando la capacità di generare prodotti direttamente a bordo del satellite in tempo reale o quasi reale. QI2S è la risposta europea all'importante sfida di rendere disponibile una piattaforma *rad-hard*, *ITAR free* facilmente configurabile ad alte prestazioni. Questa piattaforma porterà notevoli vantaggi agli utenti finali, dalla pubblica amministrazione al singolo cittadino, aiutando a superare le attuali limitazioni e rendendo accessibili informazioni provenienti dallo spazio ad un vasto pubblico in tempo reale o quasi reale. QI2S è un prototipo sviluppato e validato in laboratorio raggiungendo TRL 4.

Abstract

Next generation satellites need intensive real-time onboard processing capabilities in order to fulfill demands of compute intensive image and signal processing workloads such as hyperspectral imaging. QI2S is a project financed in the frame of the European FP7 funding programme that, in order to satisfy the community's demands for such, creates an innovative rad-hard, lightweight, low-power and massively-parallel many-core computing system augmented by specialized parallel

processing software aiming for near real-time, hyperspectral image processing and interpretation in spaceborne remote sensing missions based on Ramon Chips ITAR free RC64 architecture. This technology will be able, in the future, of reaching performances of hundreds of GOPS and tens of GFLOPS, although for demonstrational purposes it is now implemented on a downscaled FPGA. The QI2S technological concept combines a novel compute-hardware architecture and advanced image processing software leveraging a custom programming model demonstrating the potential to carry a computing performance to electric power ratio of approximately 15 GOPS/Watt or 2 GFLOPS/Watt. The hardware platform is demonstrated for real-time on-board analysis of hyperspectral data. QI2S was developed to ensure parallel computational capabilities and an easily reconfigurable architecture, able to generate on-board products in real-time or near real-time. QI2S is a prototype developed and validated in laboratory with a TRL 4.

Introduzione

I satelliti di prossima generazione necessitano di capacità computazionali *on-board* in tempo reale estremamente rilevanti per poter rispondere alle sempre maggiori richieste nell’elaborazione dei segnali e delle immagini come ad esempio l’*imaging* iperspettrale (Martimort P., 2009). Al fine di soddisfare le necessità della comunità in tale senso, il team di QI2S sta realizzando il prototipo di una piattaforma leggera per il *processing on-board* a basso consumo e con una tecnologia *manycore* per l’elaborazione massiva in parallelo, in tempo quasi-reale, di immagini iperspettrali e per la loro interpretazione in caso di missioni spaziali di osservazione remota.

Il progetto di ricerca QI2S (acronimo di “Quick Imaging Interpretation System”), realizzato nell’ambito del programma quadro FP7 della Comunità Europea, ha progettato, sviluppato e validato un prototipo in un ambiente di laboratorio: il sistema prototipale fornisce una *suite* di elaborazione immagini rappresentativa, su cui vengono eseguiti algoritmi di correzione atmosferica e radiometrica seguiti da algoritmi di identificazione spettrale di oggetti/materiali particolari.

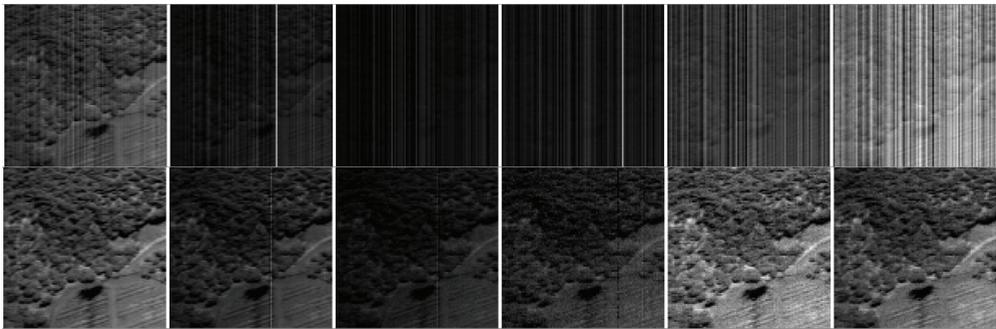


Figura 1 - Esempio di correzione radiometrica di un’immagine.

Tutto questo viene implementato da una architettura riconfigurabile, funzionante in parallelo, per dimostrare le capacità di generazione di prodotti destinati all’utente finale in tempo reale e/o quasi-reale. Il progetto QI2S ha fatto confluire assieme le competenze di diversi attori: Ramon Chips ed Elbit System Electrooptics da Israele, DSI e TU Braunschweig dalla Germania, CGS dall’Italia e ARTTIC dalla Francia. Questo progetto, strettamente concentrato su applicazioni di uso civile, rappresenta un passo importante per lo sviluppo di futuri processori per *payload*.

Contesto

I satelliti per osservazione della Terra (EOS) che implementano capacità di *imaging* iperspettrale utilizzano sensori che rilevano la radiazione compresa tra i $0,2 \mu\text{m}$ e i $2,5 \mu\text{m}$ (UV-VNIR-SWIR), tra i $3 \mu\text{m}$ e i $5 \mu\text{m}$ (MWIR) e/o tra gli $8 \mu\text{m}$ e i $14 \mu\text{m}$ (LWIR o TIR) e osservano fino a migliaia di pixel lungo una dimensione spaziale allo stesso tempo. Per ognuno di questi pixel, centinaia di bande estremamente ristrette ($10\text{-}50 \text{ nm}$) raccolgono informazioni molto precise sullo spettro radiativo del singolo pixel ($100\text{-}900 \text{ m}^2$ al suolo). Questo permette l'individuazione nell'immagine di vari materiali ed oggetti, attraverso la rilevazione delle loro univoche "firme" di radianza spettrale.

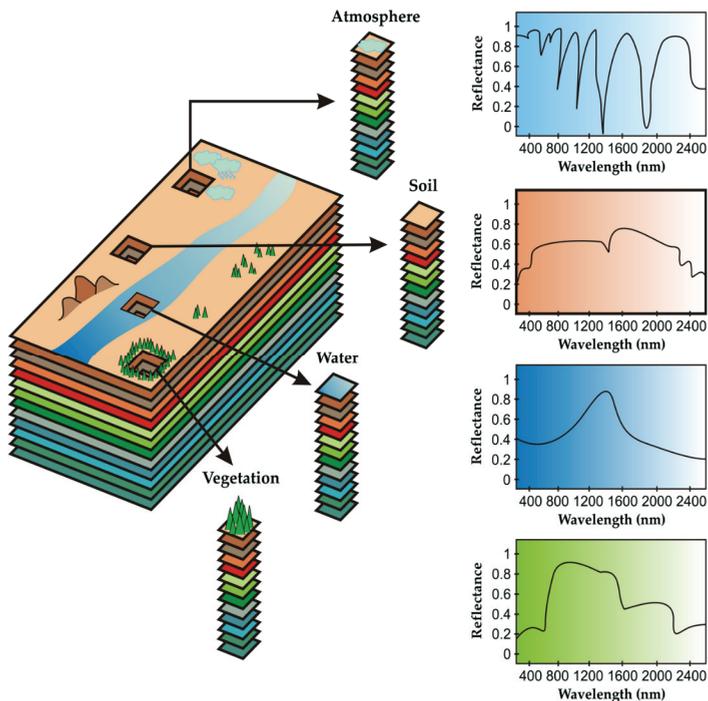


Figura 2 - Meccanismo di individuazione spettrale.

Tale differenziazione simultanea riguardante sia informazioni spaziali che spettrali crea un flusso di dati di notevoli dimensioni. L'elaborazione di tale flusso, secondo (Trautner R., 2011), tipicamente include: correzione radiometrica per distorsioni specifiche del sensore e per i cosiddetti artefatti (bias del sensore, guadagno e trasferimento di carica) e calibrazione radiometrica per i segnali di *upwelling radiance*; mascheramento delle nuvole e correzione atmosferica, che calcola la riflessione spettrale o i profili di emissione basati sulla *upwelling radiance* e le caratteristiche dell'atmosfera; e infine gli algoritmi di raccolta informazioni, per l'identificazione spettrale di oggetti o materiali specifici (es.: individuazione di anomalie, etc.). Le risultanti mappe tematiche a mosaico, con i diversi livelli di informazione, possono essere rettificati e geo-referenziati per creare un prodotto adatto all'uso diretto dell'utente finale. La necessità di osservazione remota iperspettrale dallo spazio emerge quindi drammaticamente ed è spronata da un numero in continua espansione di applicazioni in numerosi campi. Molte applicazioni in evoluzione richiedono l'accesso alle

informazioni delle immagini con rapidità tale da supportare tecniche decisionali in tempo reale. Per esempio, i casi di monitoraggio dei rischi ambientali e gestione dell'emergenza: la lotta agli incendi (l'informazione in tempo reale sulle direzioni di diffusione attese basata sull'analisi della biomassa forestale e sulle condizioni di umidità è estremamente desiderata), o ancora per la ricerca e soccorso in caso di incidenti in località remote o marittime. Tali operazioni di soccorso richiedono l'immediata individuazione di frammenti alla deriva, sopravvissuti o corpi (l'individuazione di anomalie spettrali può essere estremamente efficace in questi casi). In aggiunta, contaminazione delle acque, inquinamento dell'aria, monitoraggio delle condizioni atmosferiche e agricoltura di precisione (individuazione puntuale di malattie/stress, fertilizzazione mirata, etc.) sono alcuni dei molti campi di applicazione che possono trarre significativo beneficio dall'uso di immagini iperspettrali, ottenute in tempo reale o quasi-reale da piattaforme spaziali, e che siano facilmente reperibili, in termini di accessibilità e di costi.

Il potenziale dell'uso spaziale dell'*imaging* iperspettrale è tuttavia molto lontano dall'essere completamente sfruttato. Uno dei principali colli di bottiglia è il considerevole ritardo nel tempo di risposta, tipicamente nell'ordine delle settimane, causato dai volumi di dati estremamente grandi che devono essere prima trasmessi a terra e quindi trasferiti al centro elaborazione dati a terra, dove sono ordinati secondo priorità, quindi processati e solo allora distribuiti come prodotti utilizzabili (solitamente di base) agli utenti finali. Per esempio, un satellite orbitante a 680 km di altitudine con una velocità al suolo di circa 7000 m/s, tipicamente acquisisce immagini ad una velocità di più di 2 Gbit/s, che risultano in circa 20 Gbit di dati per una sola immagine di 70 km. Di conseguenza, molti *terabit* di informazione necessitano di essere scaricati a velocità dell'ordine di Gbit/s per facilitare l'utilizzo di dati iperspettrali in tempo quasi-reale. Un altro motivo per cui l'*imaging* iperspettrale da piattaforme spaziali è ancora lontano dalla completa realizzazione è di natura economica. Oggigiorno, la maggior parte dei sistemi di elaborazione satellitare si affidano all'uso di acceleratori *hardware* – ad esempio FPGA o ASIC (Alon D. et al., 2010) (Khalgui, M. et al., 2011) (Yarbrough S. et al., 2002) – che svolgono principalmente un singolo compito, come la compressione dell'immagine. Pur essendo gli acceleratori basati su FPGA riconfigurabili in una certa misura, essi sono molto complicati e di conseguenza costosi rispetto alla progettazione o aggiornamento di un algoritmo *software* per un processore specificamente progettato per una applicazione o uno *general-purpose* (tra queste due categorie, infatti, ricadono l'RC64 [Ginosar R., Aviely P. et al., 2014] e il prototipo di Q12S). Il prototipo di Q12S dimostra potenziali capacità di ridurre significativamente i ritardi nella consegna di informazioni estratte da immagini iperspettrali satellitari all'utente finale a terra, passando da giorni/settimane ad un tempo reale o quasi-reale (dipendentemente dall'applicazione, ad es. da poche decine di minuti fino a poche ore al massimo), con una importante componente di elaborazione iperspettrale da effettuarsi direttamente a bordo. A questo punto, solamente le informazioni estratte saranno scaricate, in pacchetti di ridotte dimensioni, e consegnate agli utenti finali, lasciando che lo scaricamento dei dati grezzi avvenga in seguito, presso i centri dati di missione, per la generazione di prodotti più avanzati a maggior valore aggiunto. In questo modo può essere raggiunto un fattore di miglioramento di circa 100 volte nei tempi di consegna e di circa 400 volte nella banda utilizzata (~5 Mb/s contro più di 2,0 Gb/s).

Soluzione proposta

Ridurre i ritardi nella consegna di informazioni utili a partire da missioni spaziali iperspettrali, utilizzando un approccio in tempo (quasi) reale di consegna dei risultati delle applicazioni, presenta una sfida importante e, ad oggi, richiede dei significativi compromessi. Ad oggi e nell'immediato

futuro, una missione spaziale commerciale e globale che realizzi le grandi potenzialità dell'*imaging* iperspettrale è assente, nonostante l'osservazione remota iperspettrale sia ormai ben consolidata e molte applicazioni applichino già degli algoritmi diretti di sfruttamento dei dati. Questa missione renderebbe l'*imaging* iperspettrale accessibile ad un vasto pubblico con diverse necessità e migliorerebbe la capacità di rispondere all'emergenza così come ad operazioni quotidiane. La capacità di calcolo ad alte prestazioni necessaria per l'interpretazione a bordo è stata, fino ad ora, inaccessibile. L'elaborazione di immagini iperspettrali è complessa e richiede grandi quantità di risorse. Ciò richiede alla piattaforma di calcolo compattezza, efficienza energetica e naturalmente resistenza alle radiazioni, al fine di essere in grado di funzionare in ambiente spaziale. La potenza di calcolo attualmente montata su sistemi spaziali è solo una frazione di ciò che sarebbe necessario per le attività di elaborazione ed interpretazione richieste. Il concetto tecnologico di QI2S combina un'innovativa architettura hardware computazionale ed un software avanzato di elaborazione delle immagini che si basa su un modello di programmazione personalizzato, dimostrando la possibilità di ottenere un rapporto prestazioni/potenza di approssimativamente 15 GOPS/W o 2 GFLOPS/W. La tecnologia che sta alla base del prototipo di QI2S è una piattaforma leggera per il processing *on-board* a basso consumo e con una tecnologia *manycore* per l'elaborazione massiva in parallelo di immagini iperspettrali. Il dimostratore realizzato è una piattaforma personalizzabile che permette prestazioni scalabili attraverso l'uso di processori multipli in simultanea comunicazione ed elaborazione, i quali possono raggiungere le decine di GFLOPS e le centinaia di GOPS (Ginosar R., Aviely P. et al., 2014), basata sull'architettura RC64 IP di Ramon Chips ed implementata su una FPGA dalle prestazioni ovviamente inferiori per fini dimostrativi. La piattaforma *manycore* è integrata con un interprete software composto da un numero finito di "unità" (chiamate *building blocks*) per l'elaborazione e l'interpretazione delle immagini iperspettrali. Questi *building blocks* sono progettati per formare il *toolbox* fondamentale, comprendente le essenziali operazioni matematiche ed i filtri, tra cui la correzione radiometrica ed atmosferica e l'individuazione di materiali/oggetti attraverso l'identificazione delle caratteristiche firme spettrali all'interno di certi intervalli spettrali o soglie. Nell'analisi delle immagini iperspettrali, per estrarre differenti tipi di informazioni dallo stesso set di dati, devono essere usate diverse procedure di elaborazione che abitualmente fanno uso di simili funzioni matematiche ma con diversi parametri, variabili, soglie e dati a priori. Queste procedure devono essere adattate attraverso semplici comandi e, di conseguenza, un linguaggio flessibile (chiamato *mission definition language*) viene proposto per permettere una rapida riconfigurazione del processo interpretativo di QI2S, stabilendo diverse catene di elaborazione per diversi scenari di *detection* iperspettrale.

Risultati attesi

Il principale risultato atteso del progetto QI2S è lo sviluppo di un dimostratore per valutare le prestazioni della piattaforma su cui viene eseguito il software, al di là delle possibili simulazioni. Il prototipo di QI2S viene implementato su una FPGA ad alte prestazioni (Xilinx Virtex 7) su cui viene realizzata una versione ridotta delle funzioni circuitali del chip RC64. Per emulare i flussi di dati derivanti dal sensore viene utilizzato un *personal computer* equipaggiato con una scheda seriale ad alta velocità (Xilinx KC705), che rappresenta il *payload*, e consente la simulazione di una serie di sensori iperspettrali ad alta velocità (2 Gb/s), il controllo e il monitoraggio del prototipo, nonché l'analisi dei risultati e delle prestazioni. Il software per l'elaborazione delle immagini iperspettrali può essere facilmente modificato e caricato all'interno del prototipo per dimostrare una serie completa di elaborazioni iperspettrali ed interpretazioni che comprendono: correzione e calibrazione

radiometrica, correzione atmosferica, identificazione dei materiali. Queste funzioni sono rappresentative dei più comuni algoritmi di elaborazione delle immagini. Questo allargherà il settore spaziale ad uno spettro più ampio di nuove applicazioni ed anche ad un nuovo modo di trasferire le applicazioni spaziali alla comunità e potenzialmente ad un nuovo mercato. Come principale risultato di questo progetto QI2S dimostrerà come sia possibile fornire al grande pubblico dei nuovi servizi che coprano le esigenze di nuove applicazioni e che permettano di ottenere grandi quantitativi di dati direttamente dallo spazio.

Bibliografia

Yarbrough S. et al. (2002), *MightySat II.1 hyperspectral imager: summary of on-orbit performance*, in *Imaging Spectrometry VII*, Proceedings of SPIE 4480:186-197.

Martimort P. (2009), *Sentinel-2 The Optical High Resolution Mission for GMES Operational Services*, Landsat Science Meeting, Rochester, NY, USA.

Alon D. et al. (2010), *JPIC: Rad-Hard JPEG2000 Image Compression ASIC*, presented at OBPDC workshop, Toulouse.

Trautner R. (2011), *ESA's Roadmap for next generation payload data processors*, DASIA.

Khalgui, M. et al. (2011), *Reconfigurable Multiagent Embedded Control Systems: From Modeling to Implementation*, *Computers IEEE Transactions on*, 60/4:538-551.

Ginosar R., Aviely P. et al. (2014), *RC64, A rad-hard many-core high-performance DSP for space applications*, DASIA.