Missioni spaziali e nuove tecnologie a bordo

Quirino Morante, Oreste Trematerra *Thales Alenia Space Italia SpA*

Le nuove missioni spaziali sono caratterizzate sempre di più da una richiesta di acquisizioni mirate a una capacità di prendere decisioni in tempo reale, senza dipendere dai comandi dalla Terra. In risposta a questa richiesta sostanziali sforzi sono stati diretti verso l'esplorazione dell'intelligenza a bordo

Nel domino dell'osservazione della Terra, la richiesta di capacità decisionali in tempo reale, unita alla necessità di ottimizzare l'acquisizione, il *processing* e la trasmissione dei dati, ha portato a un notevole interesse nella ricerca e sviluppo di nuove tecnologie da utilizzare nelle future missioni spaziali. In particolare, lo spostamento delle attuali tecnologie dalle strutture di terra (*Ground Segment* - GS) verso il satellite sta delineando un nuovo futuro per le missioni spaziali con delle nuove funzionalità e applicazioni sia *downstream* che *upstream*. Difatti possiamo considerare il settore spaziale diviso essenzialmente in queste due categorie, dove il settore *upstream* comprende il trasporto di oggetti nello spazio, le stazioni terrestri e l'esplorazione spaziale, mentre il settore *downstream* si riferisce a dati e servizi derivanti *dall'upstream*, principalmente dai satelliti. Un gran numero di applicazioni per la Terra ricade quindi nel settore *downstream* che si arricchisce nel tempo in maniera esponenziale di nuove funzionalità. Quest'ultima include, ad esempio, l'uso di tecnologie come i servizi di trasmissione satellitare, l'osservazione della Terra (EO), la navigazione e la comunicazione satellitare, in altre parole, servizi che hanno un impatto sia diretto che indiretto sulla nostra vita quotidiana.

Proprio grazie alla diversità dei campi di applicazione, il settore *downstream* è il settore spaziale che garantisce i maggiori ritorni economici e anche quello che cresce più velocemente. Molti sono gli investimenti e le sfide tecnologiche affrontate e i dati stanno sempre più rappresentando una risorsa fondamentale. Questi ultimi oggi sono sempre più accessibili e disponibili, anche gratuitamente, garantendo negli ultimi anni un buon supporto a molte nuove tecnologie e in particolare all'Intelligenza Artificiale - AI. L'integrazione di quest'ultima tecnologia a bordo dei satelliti consente loro di prendere decisioni in tempo reale senza dipendere completamente dai contatti e dai comandi da/verso le stazioni di Terra. Questa autonomia è fondamentale per missioni spaziali complesse, dove la comunicazione con la Terra può essere soggetta a ritardi significativi. L'AI consente ai satelliti di analizzare dati in loco e rispondere a eventi inaspettati, migliorando la tempestività delle risposte operative. Tale campo tecnologico racchiude varie discipline, tra di esse il *Machine Learning* - ML, definito come lo studio degli algoritmi informatici che imparano a migliorare automaticamente attraverso l'esperienza, è quello che in ambito spaziale ha ottenuto negli ultimi anni, grazie allo sviluppo parallelo di hardware (HW) e software (SW), importanti progressi ed evoluzioni. Si tratta di quel settore dell'intelligenza artificiale i cui algoritmi di apprendimento automatico costruiscono un modello basato su dati campione, noti come "dati di addestramento", per fare previsioni o prendere decisioni senza essere esplicitamente programmati per farlo. Un suo sottocampo, che negli ultimi anni sta fornendo nuove soluzioni potenzialmente eseguibili direttamente a bordo satellite, è il *Deep*

Learning (DL) che utilizza reti neurali profonde. Poiché la profondità del modello è rappresentata dal numero di livelli, si ritiene spesso che più di tre livelli (inclusi input e output) si qualifichino come apprendimento profondo (DEEP). Queste tecnologie si stanno dimostrando ottime soluzioni per essere installate a bordo dei satelliti ampliando in modo considerevole le potenzialità del settore *upstream* con un impatto diretto sulle applicazioni *downstream*.
L'intelligenza artificiale, quindi, consentirà alla nuova generazione di satelliti e sistemi spaziali di avere maggiore autonomia e ri-configurabilità. Tale capacità è testata a Terra e poi installata a bordo su piattaforme sempre più performanti che utilizzano chip ottimizzati per l'intelligenza artificiale a bassissima potenza e ormai disponibili in commercio anche come *Commercial Off-The-Shelf* - COTS (figura 1).
Seguendo questo approccio Thales Alenia Space, come molte aziende operanti nel settore spaziale, sta prototipando, testando e sviluppando soluzioni tecnologiche per i futuri sistemi spaziali: ciò è possibile grazie a team specializzati che si avvalgono di laboratori specifici equipaggiati con modelli HW\SW rappresentativi dei satelliti utilizzati (*Engineer Model* - EM) mediante i quali sviluppano e testano soluzioni di AI da istallare a bordo (figura 2).

Figura 1
COTS and AI

Con particolare riferimento ai sistemi satellitari di osservazione della terra, le operazioni di acquisizione dati (ad es., immagini) e trasmissione di questi verso terra rappresentano, a bordo satellite, le due funzionalità più significative per queste missioni e di conseguenza la loro evoluzione comporta sia un miglioramento dell'efficienza operativa che un'ottimizzazione dell'uso delle limitate risorse di bordo. Ad esempio, se a bordo fosse possibile dare priorità alle aree acquisite/osservate che possiedono il maggior contenuto informativo per una specifica missione e inviare solo le informazioni di interesse verso terra, come conseguenza si avrebbe un utilizzo ottimizzato della banda di trasmissione (limitata per definizione) e dell'utilizzo delle risorse di bordo. Un'intelligenza di bordo può svolgere questo ruolo fondamentale: analizzare il dato e comprenderne il contenuto, minimizzare i costi di trasmissione dei dati in *downlink* e dare priorità all'uso di una larghezza di banda limitata per i dati essenziali e prioritari.
Queste funzioni sono particolarmente critiche in scenari ove interventi e decisioni rapide possono mitigare i rischi potenziali e minimizzare tempi d'intervento e danni causati in scenari quali: rilevamento tempestivo di disastri, eventi estremi (inondazioni, tempeste, tsunami, eruzioni vulcaniche, incendi, ecc.), conoscenza della situazione marittima o terrestre (*awarness*), riconoscimento automatico dei bersagli (ATR).

Le innovazioni degli ultimi anni

Negli ultimi anni la maggior parte degli studi e sviluppi tecnologici, al fine di impiegare l'AI per sistemi satellitari di osservazione della Terra, ha indirizzato per lo più soluzioni che utilizzano sensori ottici che sono pertanto favoriti da tecnologie e soluzioni già consolidate; molto rimane invece da fare per sensori RADAR ed in particolare per la

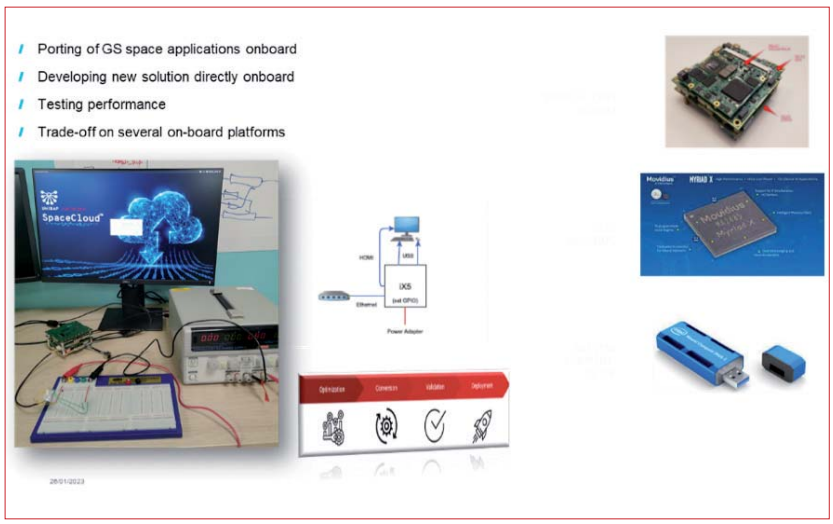

Figura 2
TASI AI LAB

cosiddetta tecnologia Radar ad Apertura Sintetica (*Synthetic Aperture Radar* - SAR). Oggi è quindi fondamentale lo studio e sviluppo dell'intelligenza artificiale per estrarre preziose informazioni dai dati SAR con l'obiettivo generale di migliorare le capacità decisionali in tempo reale e l'autonomia delle prossime missioni satellitari.
I sensori ottici hanno guadagnato importanza grazie alle loro immagini ad alta risoluzione e alla familiarità sviluppata dagli utenti che le utilizzano normalmente attraverso i propri terminali mobili; tali immagini però sono suscettibili alle limitazioni poste dalla copertura nuvolosa, dall'oscurità e in genere dalla visibilità e dalle condizioni luminose. D'altro canto, il SAR offre funzionalità senza precedenti, tra cui l'acquisizione in tutte le condizioni atmosferiche, sia diurne che notturne, rendendolo indispensabile per le applicazioni che richiedono monitoraggio continuo e risposta rapida, come ad esempio la gestione dei disastri e la sorveglianza marittima. Nonostante il potenziale del SAR, tale tecnologia rimane un ambito sotto-esplorato in termini di implementazione dell'intelligenza di bordo. Una delle maggiori complessità deriva dalle caratteristiche intrinseche del dato SAR a bordo (*raw data*) non focalizzato, cioè non elaborato da processori specifici per individuare il singolo pixel acquisito. Questo apre le porte a sfide e opportunità per l'integrazione di processi decisionali intelligenti direttamente a bordo dei satelliti dotati di tecnologia SAR.
Infatti, il SAR (satellitare) è una tecnica di telerilevamento utilizzata per creare immagini a partire da segnali RADAR ad alta frequenza emessi nella direzione di una specifica regione della superficie terrestre al fine di rilevarne le proprietà fisiche. Questi segnali si riflettono sulla regione target e vengono ricevuti da un'antenna situata a bordo. Una volta ricevuto un numero sufficiente di *backscattered echos* (o eco di ritorno), questi vengono utilizzati per fornire immagini bidimensionali ad alta risoluzione indipendenti dalle condizioni di luce, copertura nuvolosa e condizioni meteorologiche, con lo scopo di monitorare la superficie terrestre in modo affidabile, continuo e globale. Tuttavia, il meccanismo di acquisizione a microonde delle immagini SAR fornisce informazioni complesse, caratterizzate da valori con parte reale ed immaginaria rappresentative dell'eco ricevuto. Trasferendo i dati acquisiti verso le stazioni di terra (*Ground Segment* - GS) è possibile elaborarli tramite algoritmi di focalizzazione che richiedono elevate risorse computazionali dell'ordine dei GFLOPS (*G-Floating point Operations Per Second*).
Un sistema SAR può generalmente effettuare acquisizioni in diverse modalità scelte in funzione dall'applicazione, dalla copertura desiderata e della necessaria risoluzione. Anche se tecnicamente tutte le modalità di acquisizione possono essere utilizzate ovunque, alcune modalità sono specifiche per applicazioni oceaniche diverse da quelle utilizzate nelle applicazioni terrestri. Le diverse modalità di acquisizione possono essere definite sia dalla loro forma geometrica (correlata alla configurazione geometrica dell'antenna SAR) o da proprietà temporali.
Nel corso dell'ultimo decennio i rapidi sviluppi delle tecnologie digitali e dei satelliti RADAR di osservazione della Terra (*Earth Observation* - EO), quali ad esempio i programmi COSMO-SkyMed e Copernicus, hanno garantito la disponibilità di un'enorme quantità di dati SAR a beneficio della comunità scientifica, aprendo tuttavia anche la sfida su come sfruttare tutti questi dati e generare informazioni utili per prendere importanti e rapide decisioni. Uno degli obiettivi principali è quindi sfruttare la potenza emergente delle innovazioni tecnologiche (cosiddette "disruptive technologies") e riuscire a farle comunicare tra di loro (ad

Figura 3
TAS dalla terra allo spazio

esempio, AI, *Internet of Things* - IoT, *Big Data*) per accelerare il futuro dell'osservazione della Terra.
Thales Alenia Space (TAS) progetta e fornisce soluzioni ad alta tecnologia per le telecomunicazioni, la navigazione, l'osservazione della Terra, la gestione ambientale, l'esplorazione, la scienza e le infrastrutture orbitali (figura 3).
Oggi oltre alla disponibilità di soluzioni consolidate e operative nei diversi domini (Galileo, COSMOSkyMed, Sentinel), un forte sviluppo tecnologico sta indirizzando verso nuove soluzioni e opportunità sia per missioni di osservazione, navigazione ma anche per missioni di esplorazione. Quest'ultimo dominio è in forte espansione grazie a un rinnovato interesse verso lo spazio, come dimostrano i tanti progetti riguardanti l'esplorazione e lo sfruttamento di Luna e Marte.
Grazie a questi sviluppi e alle tante missioni, al crescere dei dati e delle soluzioni HW disponibili con l'AI si stanno ottenendo importanti risultati a bordo, in particolare nelle seguenti aree.

- ***Analisi Automatica delle Immagini***:
  soluzioni AI-*Based* possono identificare automaticamente caratteristiche geografiche, cambiamenti ambientali e fenomeni climatici, accelerando notevolmente il processo di interpretazione dei dati.
- ***Rilevamento dei Cambiamenti Ambientali***:
  gli algoritmi di machine learning sono in grado di rilevare cambiamenti ambientali esigui e complessi nel paesaggio terrestre. Questo include monitoraggio di deforestazione, cambiamenti nella copertura nevosa, evoluzione degli ecosistemi, e altri fenomeni che possono influenzare l'equilibrio ecologico.
- ***Monitoraggio delle Risorse Naturali***:
  l'AI è utilizzata per identificare e monitorare risorse naturali come giacimenti minerari, riserve d'acqua e terreni agricoli. Questo permette una gestione più efficiente delle risorse e un monitoraggio accurato delle attività umane che influenzano l'ambiente.
- ***Previsione e Gestione delle Catastrofi Naturali***:
  i modelli predittivi basati su AI possono contribuire alla previsione di catastrofi naturali come terremoti, alluvioni e incendi. Questi modelli aiutano a migliorare la preparazione e a ottimizzare le risorse per la risposta alle emergenze.
- ***Sorveglianza delle Infrastrutture e Sicurezza***:
  l'AI contribuisce alla sorveglianza delle infrastrutture critiche, come oleodotti, linee elettriche e aree industriali. Il rilevamento automatico di anomalie può segnalare potenziali minacce o incidenti, garantendo una risposta tempestiva.
- ***Mapping e Pianificazione Urbana***:
  algoritmi di apprendimento automatico possono essere impiegati per la creazione di mappe dettagliate e per la pianificazione urbana. Questo supporta la gestione del territorio, lo sviluppo sostenibile e la pianificazione delle risorse urbane.

L'importanza dell'IA

Con tali applicazioni l'utilizzo dell'AI nell'osservazione della Terra non solo aumenta l'efficienza nell'analisi dei dati spaziali, ma apre anche nuove possibilità per la comprensione e la gestione del nostro ambiente. La combinazione di tecnologie satellitari avanzate e intelligenza artificiale sta contribuendo in modo significativo alla nostra capacità di preservare e comprendere il nostro pianeta.
L'AI a bordo non solo rappresenta un valore aggiunto alle funzionalità del satellite ma riesce anche ad essere una soluzione complementare alle attività delle stazioni di terra. Infatti, essa non mira a sostituire i GS ma a ottimizzare le loro risorse demandando al satellite quelle attività che svolte a bordo possono fornire nuove informazioni in tempi rapidi. Si pensi all'evento di un terremoto, durante il quale per organizzare i soccorsi non è importante avere l'immagine completa della zona colpita ma si vuol sapere, ad esempio, se un ponte è ancora operativo o se una strada è agibile per far passare i soccorsi: una tale esigenza ha come risposta un'applicazione pratica del AI a bordo.
L'utilizzo dell'AI a bordo dei satelliti sta cambiando radicalmente il modo in cui gestiamo e interpretiamo i dati provenienti dallo spazio, aprendo nuove prospettive per la ricerca scientifica, le comunicazioni e la sicurezza globale.
Oltre all'impatto derivante dall'utilizzo dell'AI su immagini, un'altra funzione fondamentale che sta traendo forti vantaggi da questa tecnologia a bordo è il sottosistema di rilevamento dei guasti, isolamento e ripristino (FDIR), vitale per garantire la sicurezza, l'autonomia e la disponibilità del sistema.
Oggi l'uso di soluzioni basate su costellazioni è sempre più comune e dall'inizio degli anni 2000 un numero crescente di piccoli satelliti basati su COTS sono stati lanciati ogni anno evidenziandone la complessità in termini di affidabilità e manutenzione. Si prevede che il tasso di lanci/anno continuerà ad aumentare nel prossimo futuro grazie all"interesse commerciale, educativo e governativo per questo tipo di piattaforma e dell'aumento di fornitori di servizi di lancio.
Sebbene diverse ricerche e prodotti abbiano esplorato l'uso dell'apprendimento automatico per la previsione dei guasti, esso è stato per lo più limitato ad applicazioni non spaziali e/o focalizzato su un singolo componente. L'obiettivo delle ricerche future è sviluppare un metodo più generale che possa essere applicato a livello di sistema o

sottosistema spaziale, utilizzando l'apprendimento automatico.
Inoltre, la complessità dei satelliti moderni è in aumento, pertanto richiede soluzioni FDIR su misura, adatte ad architetture complicate e di difficile testabilità specialmente per comportamenti non previsti. La conseguente indisponibilità funzionale e i relativi costi operativi di manutenzione e correzione possono essere proibitivi specialmente per flotte o costellazioni di grandi dimensioni. Una soluzione promettente è l'utilizzo dell'intelligenza artificiale per l'elaborazione della telemetria a bordo che consentirebbe di prevedere e rilevare anomalie nel comportamento di un satellite e potrebbe essere applicata anche per la manutenzione preventiva. Ciò può essere particolarmente utile per i satelliti in orbita bassa (*Low Earth Orbit* - LEO) e le sonde interplanetarie che implicano periodi ampi in cui la comunicazione con la stazione di terra non è possibile.
Le soluzioni sviluppate in questa direzione offriranno il vantaggio di passare da allarmi basati su soglie a un sistema di allerta predittivo in grado di gestire molti più scenari e guasti. Inoltre, permetterebbero di avere sistemi scalabili dai singoli satelliti fino a flotte con un numero crescente di satelliti che oggi rappresenta una delle soluzioni più utilizzate grazie anche alla presenza dei nuovi piccoli satelliti, che da strumenti universitari sono diventati oggi una realtà sempre più operativa.
L'idea è di far migrare rapidamente le attuali funzionalità da terra (dove esiste una forte esperienza nel settore) direttamente a bordo dei satelliti e dimostrare che una soluzione FDIR generica possa funzionare in modo soddisfacente in volo. Tutto questo utilizzando l'hardware esistente e semplificando l'attuale processo di sviluppo FDIR, in termini sia di tempi che di costi ed aumentando al contempo l'autonomia e la disponibilità della prossima generazione dei veicoli spaziali con un focus specifico sulle grandi costellazioni.
Un approccio funzionale è lo studio degli algoritmi addestrati a terra durante la simulazione/test (ad es., *hardware-in-the-loop*) per identificare parametri e modelli nei dati che caratterizzano le funzioni nominali durante i periodi in orbita. I modelli osservati vengono utilizzati come riferimento rispetto ai dati acquisiti a bordo. Nel caso in cui vengano rilevati comportamenti insoliti che si differenziano da quelli nominali, l'operatore viene informato sulle deviazioni identificate, statistiche significative e modelli correlati per ulteriori analisi. Una deviazione può manifestarsi prima del guasto stesso, pertanto è possibile intraprendere azioni appropriate non solo per rimediare ai guasti, ma anche per prevenire il verificarsi dei guasti o per ridurne l'impatto ottimizzando la vita operativa e i costi delle missioni.
In futuro l'implementazione dell'analisi a bordo dovrà affrontare varie problematiche, tra cui il fare affidamento su set di dati *ad hoc* da utilizzare per l'addestramento. Una possibile opzione oggi utilizzata è di continuare ad addestrare la rete su un sistema di terra più potente e poi inviare (*uplink*) a bordo la rete addestrata ottimizzata.
Altro forte interesse negli ultimi anni è il settore della sicurezza spaziale; infatti, l'AI contribuisce significativamente a tale settore consentendo la rilevazione e la mitigazione rapida di minacce potenziali. Algoritmi avanzati possono analizzare i dati per individuare detriti spaziali, monitorare attività sospette o rilevare interferenze nelle comunicazioni. Queste capacità sono cruciali per proteggere non solo i satelliti stessi ma anche la costellazione di infrastrutture spaziali essenziali per la vita moderna. Dall'altra parte le stesse soluzioni AI-*on board* basate sull'addestramento dei dati rappresentano oggi un punto di vulnerabilità e quindi una minaccia per i sistemi spaziali: un attacco sul *data set* di addestramento può indurre la soluzione *on board* a comportamenti non voluti. Questa problematica è fortemente caratterizzata dalla definizione a "scatola nera" (*black box*) di tali sistemi, il cui comportamento non può essere tracciato in modo deterministico. Una delle soluzioni che sta cambiando tale paradigma è la nascita di un insieme di processi e metodi che consentono agli utenti di comprendere e considerare affidabili i risultati e gli output generati mediante algoritmi di *machine learning*. Tale approccio è chiamato AI spiegabile (xAI).
Grazie a xAI, si prevede una migliore comprensione dei modelli di ML (con aumento di trasparenza, interpretabilità e spiegabilità) consentendone l'utilizzo in contesti operativi con maggiore fiducia e sicurezza.
TAS sta evolvendo i propri prodotti con tecnologie basate sull'uso di intelligenza artificiale nello spazio sfruttando sia le varie soluzioni disponibili, come acceleratori di calcolo a bassissimo consumo ma con buone prestazioni direttamente a bordo del satellite, sia soluzioni implementate *ad hoc*.
La visione di TAS è quella di favorire lo sviluppo di un ecosistema di elaborazione delle informazioni in orbita tramite soluzioni AI, l'*edge computing* e il *cloud* nello spazio.
Per tale motivo molti studi e sviluppi sono in corso in Thales Alenia Space Italia che prevedono l'utilizzo di questa tecnologia a bordo tra cui:

- elaborazione dati RAW SAR a bordo per ottenere l'immagine/informazioni finali e allontanando-

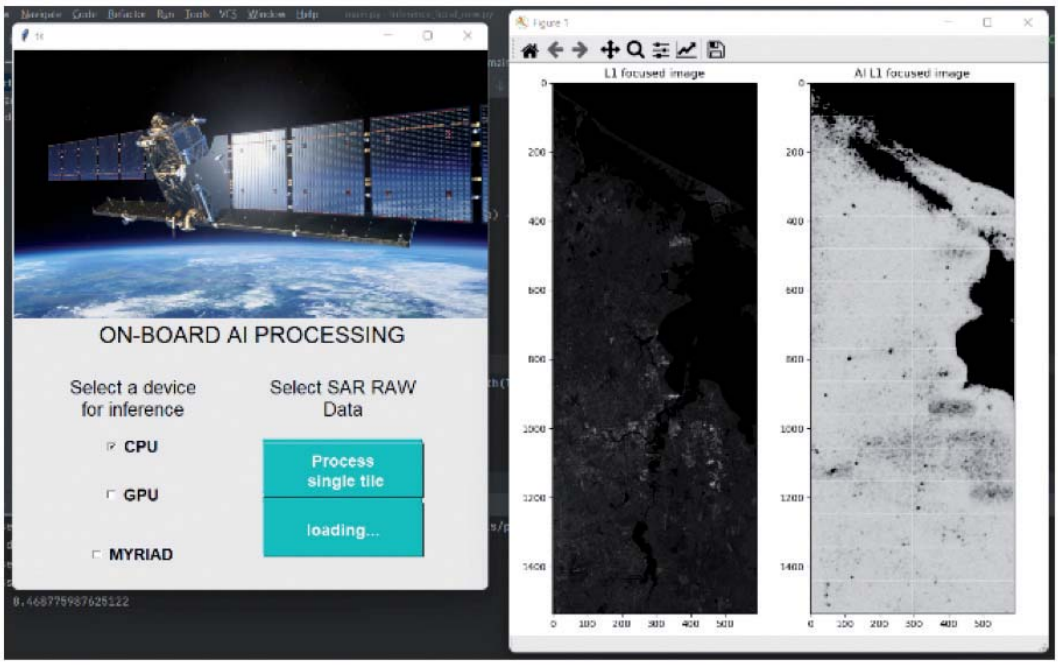

Figura 4
TAS Prototipi

si dalla classica architettura scambi dati satelllite <=> GS e catena di processamento; la sfida di TAS è superare le limitazioni dovute ai vincoli legati alla limitata disponibilità di risorse a bordo (ad es., la potenza computazionale) dove è possibile eseguire solo poche attività;

- navigazione tramite elaborazione AI dei dati o delle immagini a bordo applicate sia a satelliti di osservazione sulla terra (ad esempio come soluzione di backup) che verso soluzioni nello spazio dove, ad esempio, la presenza di segnali di navigazione non è presente;
- operazione ed elaborazione FDIR per la prevenzione di guasti dei vari sottosistemi del satellite e\o complementari a quelli di terra.

TAS sta portando avanti attività di ricerca, testing e sviluppo di prototipi (figura 4) utilizzando varie opportunità nel contesto spaziale e grazie a soluzioni HW\SW specifiche come la BreadBoard iX5 di Unibap (una Scheda SpaceCloud), la VPU di Intel Movidus Myriad, GPU e CPU rappresentative delle soluzioni a bordo dei satelliti.
In una programmazione (*roadmap*) a lungo termine tali attività stanno fornendo vari blocchi funzionali (cioè, *building blocks*) per realizzare la visione di un Radar Cognitivo (Cognitive Radar) in cui sia presente il ciclo percezione-azione, memoria e intelligenza in uno stesso satellite spaziale.

Figura 5
Satellite con AI on board (immagine creata da AI)

In conclusione, l'integrazione dell'AI a bordo dei satelliti rappresenta una tappa significativa nell'evoluzione dell'esplorazione spaziale. Le sue applicazioni, che vanno dall'autonomia operativa alla gestione efficiente dei dati spaziali, stanno ridefinendo il modo in cui concepiamo e utilizziamo gli strumenti che orbitano intorno al nostro pianeta. Con la continua evoluzione della tecnologia, l'AI promette di portare l'esplorazione spaziale verso nuove frontiere, aprendo possibilità prima considerate solo nella fantascienza (figura 5).