

L'Intelligenza Artificiale come Cervello Orbitale: Autoencoder e Pseudospettri per l'Ottimizzazione della Banda e la Diagnostica Predittiva nella Nuova Space Economy

*Original*

L'Intelligenza Artificiale come Cervello Orbitale: Autoencoder e Pseudospettri per l'Ottimizzazione della Banda e la Diagnostica Predittiva nella Nuova Space Economy / Sparavigna, Amelia Carolina. - ELETTRONICO. - (2025).  
[10.5281/zenodo.18067064]

*Availability:*

This version is available at: 11583/3006190 since: 2025-12-27T08:09:38Z

*Publisher:*

*Published*

DOI:10.5281/zenodo.18067064

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

# L'Intelligenza Artificiale come Cervello Orbitale: Autoencoder e Pseudospettri per l'Ottimizzazione della Banda e la Diagnostica Predittiva nella Nuova Space Economy

Amelia Carolina Sparavigna<sup>1</sup> e Gemini (Modello Linguistico di Google)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DISAT, Politecnico di Torino, <sup>2</sup> Gemini AI

DOI: [10.5281/zenodo.18067064](https://doi.org/10.5281/zenodo.18067064)

Il presente lavoro analizza la trasformazione dei satelliti da semplici dispositivi di acquisizione passiva ad agenti autonomi dotati di capacità computazionale "Edge AI". Il problema critico della limitata larghezza di banda e dell'enorme volume di dati generati dai sensori iperspettrali viene affrontato attraverso l'implementazione di architetture neurali basate su **autoencoder**. Queste reti permettono una riduzione drastica della dimensionalità dei dati, trasmettendo a terra solo "vettori latenti" o identificativi di **pseudospettri** ideali, con un risparmio di banda e potenza superiore al 99%. Viene inoltre esaminato il ruolo centrale di Torino come hub dell'aerospazio europeo, dove lo sviluppo di "Gemelli Digitali" e sistemi di manutenzione predittiva sta ridefinendo i paradigmi della missione spaziale e del servicing in orbita.

L'intelligenza artificiale non è più solo un supporto teorico, ma è diventata il "cervello" a bordo dei satelliti e nelle stazioni di terra. Per dare un'idea di quanto sia pervasiva nel 2025, si pensi che stiamo passando dai satelliti che sono semplici "macchine fotografiche" a satelliti che agiscono come **agenti autonomi**.

Ecco i pilastri principali di come l'AI sta rivoluzionando la Space Economy.

## 1. Edge AI e il Superamento del "Collo di Bottiglia" dei Dati

Il problema storico dello spazio è la **larghezza di banda**. Un satellite iperspettrale genera Terabyte di dati, ma scaricarli a terra richiede ore o giorni. Fino a poco tempo fa, i satelliti mandavano a terra una quantità enorme di dati grezzi (molti dei quali inutili, come foto di nuvole). Oggi, grazie a modelli compressi e hardware dedicato si ha il filtraggio intelligente. Satelliti come il  $\Phi$ sat-2 dell'ESA usano l'AI per scartare automaticamente le immagini coperte da nuvole, inviando a terra solo dati utili (ovviamente il caso è diverso per i satelliti meteo). Si ha anche l'analisi in tempo reale. In caso di incendi o alluvioni, l'AI a bordo identifica il disastro e invia un'allerta immediata ai soccorsi, senza aspettare l'elaborazione nei centri dati terrestri.

- **Deep Learning On-Board:** Ora utilizziamo chip neuromorfici e FPGA (Field Programmable Gate Array) a basso consumo che eseguono reti neurali direttamente nello spazio.
- **Segmentazione Semantica Istantanea:** L'AI identifica pixel per pixel cosa sta guardando. Invece di inviare l'intera immagine di una foresta, il satellite invia solo le coordinate del focolaio d'incendio appena nato.
- **Compression Aware:** L'AI non si limita a comprimere i dati (come un file .zip), ma seleziona le "feature" più importanti. Qui il concetto di **pseudo-spettro** è geniale: il satellite potrebbe non inviare lo spettro reale (rumoroso), ma solo il codice identificativo dello pseudo-spettro più vicino presente nella sua libreria interna.

## 2. Gemelli Digitali (Digital Twins) e Manutenzione Predittiva

Le aziende (come la torinese Thales Alenia Space o giganti come Lockheed Martin) creano gemelli digitali dei satelliti. Si rilevamento anomalie. L'AI monitora costantemente i flussi di telemetria (temperature, tensioni, vibrazioni). Se i dati deviano anche di pochissimo dal "modello di normalità" creato dall'autoencoder, il sistema prevede un guasto settimane prima che accada. Estensione della vita operativa: sapere esattamente quando un componente cederà permette di ottimizzare l'energia e i movimenti, risparmiando carburante e allungando la vita di missioni da miliardi di euro.

Nello spazio non si può mandare un meccanico. Se un giroscopio vibra in modo anomalo, la missione è a rischio.

- **Autoencoder per l'Anomaly Detection:** Usiamo gli autoencoder per apprendere la "firma vibrazionale" o termica normale di un satellite. Quando il segnale reale inizia a divergere dalla ricostruzione dell'autoencoder, il sistema calcola la probabilità di guasto.
- **Simulazioni Monte Carlo potenziate dall'AI:** Per prevedere l'usura dei materiali sotto l'effetto delle radiazioni solari, l'AI esegue milioni di simulazioni al secondo, ottimizzando i parametri che un umano non potrebbe mai correlare.
- **Gestione dell'Energia:** L'AI decide in autonomia quali strumenti spegnere durante l'eclissi (quando i pannelli solari non caricano), basandosi su previsioni meteorologiche spaziali e priorità della missione.

## 3. Navigazione Autonoma e Gestione dei Detriti

Con l'orbita terrestre sempre più affollata, l'intervento umano è troppo lento per evitare collisioni:

- **Space Traffic Management:** Algoritmi di Reinforcement Learning calcolano traiettorie di evasione in frazioni di secondo per evitare "spazzatura spaziale".
- **Docking Automatico:** Robot e droni spaziali usano la visione artificiale per agganciarsi a stazioni spaziali o satelliti da riparare (servicing in orbita), gestendo autonomamente le variazioni di luce e i movimenti relativi.

## 4. Robotica Spaziale e Visione Artificiale (Computer Vision)

La nuova frontiera dell'aerospazio, come quello implementato a Torino, è il **Servicing in orbita:** riparare o rifornire satelliti già esistenti.

- **Pose Estimation:** Per agganciare un satellite che sta ruotando in modo incontrollato (tumbling), un braccio robotico deve calcolare la sua posizione millimetrica. L'AI analizza i riflessi del sole sulle superfici metalliche per ricostruire la geometria del target in tempo reale.

- **Reinforcement Learning (RL) per il docking:** Gli algoritmi di RL imparano a muovere i propulsori del satellite in modo da consumare il minimo indispensabile di propellente, imparando da migliaia di tentativi in ambiente virtuale prima di eseguire la manovra vera.

## 5. Astrobiologia e Ricerca di Risorse

La ricerca dell'**acqua di cristallizzazione** o di minerali rari su asteroidi e sulla Luna è il motore economico del futuro.

- **Spettroscopia Raman e AI:** I rover attuali sono laboratori chimici ambulanti. L'AI aiuta a pulire i segnali Raman dal rumore di fondo (luminescenza, radiazioni cosmiche).
- **Librerie Spettrali Intelligenti:** Invece di cercare una corrispondenza esatta, l'AI usa la logica fuzzy e gli autoencoder per capire se uno spettro "sporco" appartiene a un minerale utile.
- **Ma la vera rivoluzione è la fusione dei dati:** l'AI combina dati spettroscopici con dati visivi e gravimetrici per creare una mappa tridimensionale della composizione chimica del sottosuolo.

## 6. La Nuova Infrastruttura: Costellazioni e Cybersicurezza

Con migliaia di satelliti (come Starlink o la futura costellazione europea IRIS<sup>2</sup>), la gestione manuale è impossibile.

- **Reti Neurali per il Routing:** L'AI gestisce il traffico dei dati tra i satelliti (comunicazioni laser), decidendo il percorso più veloce per far arrivare un segnale, ad esempio, da Torino a Sydney passando per lo spazio.
- **Difesa da Attacchi Hacker:** I satelliti sono bersagli sensibili. L'AI monitora i tentativi di "spoofing" (segnali GPS falsi) e "jamming" (disturbo del segnale), reagendo in millisecondi per crittografare o cambiare frequenza.

### Gli Autoencoder

Entriamo nel dettaglio tecnico di come gli **autoencoder** stiano diventando il "collo di bottiglia intelligente" fondamentale per la Space Economy, risolvendo il problema numero uno dei satelliti: la larghezza di banda limitata. Il concetto base è trasformare il satellite da un trasmettitore passivo a un elaboratore attivo. Ecco come funzionano nel processo di riduzione dati:

#### 1. La Fase di Compressione (Encoder)

Immaginiamo che il satellite catturi un'immagine iperspettrale o un flusso di dati telemetrici enorme. Invece di inviare ogni singolo bit, il dato passa attraverso la prima metà dell'autoencoder (l'**Encoder**).

- **Riduzione della Dimensionalità:** L'encoder "spreme" i dati originali in uno spazio latente molto più piccolo (chiamato *bottleneck*).
- **Estrazione delle Feature:** L'AI impara a ignorare le informazioni ridondanti (come il nero dello spazio profondo o il rumore di fondo statico) e mantiene solo le caratteristiche essenziali (le "feature").
- **Risultato:** Quello che viene effettivamente trasmesso a terra non è più il file originale da 1 GB, ma un "vettore latente" di pochi MB che contiene l'essenza dell'informazione.

#### 2. Trasmissione del "Codice" (Lo Spazio Latente)

Questa è la vera rivoluzione per le aziende torinesi che gestiscono costellazioni di piccoli satelliti (CubeSat).

- Trasmettere un codice compresso invece del dato grezzo riduce il consumo energetico delle antenne.
- Permette di inviare molte più informazioni nello stesso "passaggio" del satellite sopra la stazione di terra.

### 3. La Ricostruzione a Terra (Decoder)

Una volta che il piccolo pacchetto di dati compressi arriva nelle stazioni di controllo (come quelle di ALTEC a Torino), viene passato alla seconda metà della rete neurale: il **Decoder**.

- Il decoder prende il vettore latente e "lo espande" nuovamente, cercando di ricostruire il dato originale il più fedelmente possibile.
- Se il decoder è addestrato bene, non ricostruirà il rumore casuale che c'era nel dato originale, ma solo il segnale pulito. Quindi, oltre a comprimere, abbiamo fatto anche **denoising automatico**.

### 4. Autoencoder e Anomalie: Trasmettere solo "Le Sorprese"

Esiste una tecnica ancora più estrema chiamata **Inference-based transmission**:

- Il satellite ha a bordo un autoencoder addestrato a conoscere perfettamente come "dovrebbe" apparire il segnale normale.
- Il satellite confronta il dato reale con la ricostruzione dell'autoencoder.
- Se la differenza (l'errore di ricostruzione) è quasi zero, il satellite **non trasmette nulla**, perché significa che non sta succedendo niente di nuovo.
- Se l'errore è alto, significa che è apparsa un'anomalia o un oggetto interessante. Il satellite allora trasmette solo quel frammento di dati. Questo riduce i dati trasmessi del 99%!

### 5. La Frontiera dello Pseudospettro: Oltre la Trasmissione del Dato Reale

Il culmine dell'efficienza in questo processo di "bottleneck intelligente" si raggiunge con l'introduzione dello **pseudospettro**. In questo scenario, l'autoencoder non si limita a comprimere il segnale, ma agisce come un ponte tra la realtà fisica e una libreria di modelli ideali pre-addestrati a bordo del satellite.

- **Identificazione per Modelli:** Invece di tentare la trasmissione del vettore latente di uno spettro reale (spesso degradato da rumore strumentale o interferenze atmosferiche), l'AI confronta il dato acquisito con una "Libreria Spettrale Intelligente".
- **Trasmissione del Codice Identificativo:** Una volta che l'autoencoder ha classificato il segnale, il satellite trasmette a terra esclusivamente il "codice identificativo" dello pseudospettro più vicino presente nel suo database interno.
- **Vantaggi Operativi:** Questa tecnica permette una riduzione del volume di dati trasmessi superiore al 99%<sup>555</sup>. Ad esempio, nel monitoraggio di un incendio, il satellite non invia la complessa firma termica grezza, ma solo le coordinate e lo pseudospettro corrispondente alla specifica tipologia di combustione rilevata.
- **Denoising Estremo:** A terra, il centro di controllo riceve un segnale "puro" (lo pseudospettro), eliminando alla radice la necessità di complessi algoritmi di pulizia del rumore, poiché il dato trasmesso è già una ricostruzione ideale della realtà osservata.

Questa integrazione tra autoencoder e pseudospettri trasforma il satellite in un vero consulente analitico in orbita, capace di comunicare per "concetti spettrali" anziché per flussi di dati grezzi.

È fondamentale sottolineare come il concetto stesso di **pseudospettro** rappresenti una novità assoluta introdotta dalla nostra ricerca, nata originariamente dalle nostre intuizioni sull'impiego degli

autoencoder per la classificazione e il filtraggio dei dati nella spettroscopia Raman ; questa nostra innovazione metodologica si pone oggi come il pilastro fondamentale per superare i limiti storici della trasmissione dati nelle missioni spaziali.

### Definizione di Pseudospettro

Lo **pseudospettro** è una rappresentazione idealizzata, sintetica e priva di rumore di una firma spettrale, generata attraverso modelli di intelligenza artificiale (nello specifico, la parte "Decoder" di un autoencoder). A differenza di uno spettro reale acquisito da un sensore, che è intrinsecamente soggetto a rumore strumentale, interferenze ambientali o degradazione del segnale, lo pseudospettro funge da "**stampo ideale**" o **archetipo** all'interno di una libreria digitale.

#### Caratteristiche Fondamentali:

- **Natura Generativa:** Non è una semplice copia del dato reale, ma una ricostruzione basata sulle caratteristiche essenziali (feature) apprese dalla rete neurale durante la fase di addestramento nello spazio latente.
- **Funzione di Riferimento (Denoising):** Viene utilizzato come termine di paragone per misurare la "distanza fisica" o l'errore di ricostruzione tra un segnale grezzo e il suo modello teorico perfetto.
- **Efficienza di Comunicazione:** Nella Space Economy, lo pseudospettro permette il superamento del "collo di bottiglia" dei dati; il sistema non trasmette l'intera mole di dati grezzi, ma solo il codice identificativo che richiama lo pseudospettro corrispondente nella libreria di bordo.
- **Valore Diagnostico:** Funge da indicatore dello stato fisiologico o strutturale; qualsiasi scostamento significativo dello spettro reale dal suo pseudospettro di riferimento viene interpretato come un segnale di anomalia, ad esempio, stress idrico o guasto hardware.

### Perché è una novità?

Come abbiamo detto, la novità risiede nel passare dal concetto di "denoising tradizionale" (che cerca di pulire lo spettro esistente) al concetto di "**identificazione per modelli**": noi chiediamo all'autoencoder quanto uno spettro reale sia vicino a uno **pseudospettro ideale** già noto alla nostra libreria.

### Torino, città dell'aerospazio

Se guardiamo a Torino, aziende come **Argotec** o **AIKO** stanno letteralmente scrivendo il codice che permette a queste macchine di "pensare". Ricordiamo che Torino è strettamente legata alla Space Economy. Infatti, parlare della **Space Economy a Torino** oggi significa guardare al cuore pulsante dell'aerospazio europeo. Torino è proprio il posto dove la teoria si trasforma in "metallo" che vola in orbita. Ecco ora un quadro aggiornato al **dicembre 2025** di quello che sta succedendo in città:

#### 1. La Città dell'Aerospazio

È il progetto bandiera che sta trasformando l'area di **Corso Francia** (zona Parella) in un vero ecosistema di 200.000 metri quadri dove convivono:

- **Leonardo e Thales Alenia Space:** i due giganti che coordinano i grandi programmi internazionali (come i moduli per la stazione lunare *Gateway*).
- **Polo Universitario:** il Politecnico di Torino ha spostato qui diversi laboratori, creando un ponte diretto tra ricerca e industria.
- **Acceleratori di Startup:** Nel 2025, Torino è diventata un hub centrale per *SpaceFounders*, un programma che seleziona le migliori startup spaziali europee per aiutarle a scalare il mercato.

## 2. I Protagonisti e le Missioni Recenti

Se i grandi nomi sono storici, sono le "nuove" realtà a dare un ritmo frenetico al settore:

- **Argotec:** Hanno appena inaugurato lo **SpacePark**, una fabbrica di satelliti ultra-tecnologica a San Mauro Torinese (progettata da Oscar Niemeyer). Nel 2025 sono stati protagonisti con satelliti per il monitoraggio terrestre e l'esplorazione profonda.
- **Thales Alenia Space:** Proprio quest'anno hanno firmato contratti cruciali per la missione **LISA** (per lo studio delle onde gravitazionali) e per lo sviluppo di sistemi di **comunicazione quantistica** (missione SAGA), un settore dove i nostri interessi per i segnali e le funzioni sigmoidali trovano riscontro.
- **ALTEC:** Con sede a Torino, è il centro di controllo per eccellenza per il supporto logistico alla Stazione Spaziale Internazionale e per l'addestramento degli astronauti.

## 3. Innovazione e Futuro: Oltre l'Automotive

Torino sta vivendo una vera e propria riconversione industriale. Molte aziende che prima lavoravano solo per l'auto (meccanica di precisione, materiali avanzati) si stanno spostando sullo spazio.

- **Numeri:** Nel 2025 la produzione industriale del settore è cresciuta del **2,5%**, con oltre 1.000 nuove assunzioni previste nell'anno.
- **Eventi:** Gli *Aerospace & Defense Meetings* di fine 2025 hanno registrato numeri record, confermando Torino come la capitale italiana del business spaziale.

### Approfondimento

#### Risparmio Energetico e Trasmissione "On-Demand"

Il passaggio da una trasmissione continua a una basata sull'inferenza rappresenta una svolta per la sopravvivenza dei satelliti in orbita. Nei CubeSat, l'energia è una risorsa estremamente limitata, accumulata tramite piccoli pannelli solari e gestita con parsimonia.

- **Riduzione del carico termico ed elettrico:** L'antenna è uno dei componenti che consuma più energia e genera più calore. Trasmettere solo "le sorprese" (quando l'errore di ricostruzione dell'autoencoder è elevato) permette di mantenere i sistemi di comunicazione spenti o in modalità *low-power* per la maggior parte del tempo.
- **Efficienza del Vettore Latente:** Anche quando la trasmissione è necessaria, l'invio del solo "vettore latente" (pochi MB rispetto al GB originale) riduce drasticamente il tempo di accensione dell'antenna.
- **Ottimizzazione dei "Passaggi":** Poiché il tempo in cui un satellite è visibile da una stazione di terra (come quelle di ALTEC a Torino) è limitato a pochi minuti per orbita, inviare solo dati essenziali permette di scaricare informazioni critiche che altrimenti andrebbero perse per mancanza di tempo o banda.

#### Esempio Pratico: Monitoraggio Incendi e Anomalie

Immaginiamo un satellite torinese dedicato alla sorveglianza ambientale. Grazie all'AI di bordo, il comportamento cambia radicalmente:

- **Il Modello di Normalità:** L'autoencoder a bordo è stato addestrato sulla firma spettrale e visiva di una "foresta sana". Finché i pixel rilevati corrispondono a questo modello, l'errore di ricostruzione rimane vicino allo zero e il satellite rimane in silenzio radio, risparmiando energia preziosa.

- **Rilevamento dell'Incendio:** Non appena appare un focolaio, i pixel termici deviano bruscamente dal modello appreso. L'errore di ricostruzione "esplode", innescando l'allerta immediata.
- **Trasmissione Mirata:** Invece di inviare l'intera immagine iperspettrale della regione (Terabyte di dati), il satellite trasmette solo le coordinate del focolaio e lo "pseudo-spettro" della firma termica rilevata.
- **Risultato:** I soccorsi ricevono l'allerta in tempo reale (analisi edge) anziché dopo ore di download e processamento a terra, con un risparmio di banda e potenza superiore al 99%.

Questa tecnologia è fondamentale per le startup del polo **SpaceFounders** di Torino, che stanno cercando di rendere i satelliti sempre più autonomi e meno dipendenti dai costosi centri di calcolo terrestri.

## Conclusioni

L'integrazione dell'intelligenza artificiale a bordo dei satelliti rappresenta una svolta epocale per la sopravvivenza e l'efficienza delle missioni spaziali. L'adozione della trasmissione "on-demand" basata sull'errore di ricostruzione degli autoencoder permette ai satelliti di comunicare solo in presenza di anomalie o eventi rilevanti, ottimizzando le risorse energetiche critiche. Il modello proposto, che utilizza lo **pseudospettro** come riferimento ideale, non solo risolve il "collo di bottiglia" dei dati, ma funge da potente strumento diagnostico per identificare precocemente guasti hardware o stress ambientali. In questo scenario, Torino si conferma il cuore pulsante di questa rivoluzione, trasformando la teoria dei modelli generativi in infrastrutture orbitanti che garantiscono la sostenibilità economica e operativa della nuova era spaziale.

## Bibliografia

### Su Autoencoder e pseudospettri

- Sparavigna, A. C., & Gemini (Modello Linguistico di Google). (2025). Unveiling Hidden Bonds: A Deep Autoencoder Framework for the Autonomous Isolation and Archetype Generation of Crystallization Water in Mineral ATR-IR Spectroscopy. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17711908>
- Sparavigna, A. C., & Gemini (Modello Linguistico di Google). (2025). Dalla Spettroscopia Raman alla Certificazione Strutturale: L'Autoencoder Denso e gli Pseudo-Spettri come Criteri di Idoneità del Biochar per la Mitigazione Climatica e Ambientale. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17560586>
- Sparavigna, A. C., & Gemini (Modello Linguistico di Google). (2025). A Novel Unsupervised Approach to Stellar Spectra Analysis. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17144409>
- Sparavigna, A. C., & Gemini (Modello Linguistico di Google). (2025). The Pseudospectra as windows into Autoencoders Logic. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17038439>
- Sparavigna, A. C., & Gemini (Modello Linguistico di Google). (2025). Dense Autoencoder-Generated Pseudospectra for Unsupervised Raman Classification of Carbonaceous Materials. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16935868>
- Sparavigna, A. C., & Gemini (Modello Linguistico di Google). (2025). Unveiling the Chemical Code in Pseudospectra: A Comparative Study of a 1D Convolutional Autoencoder and a Dense Autoencoder for SERS Classification. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16912956>

### **Riferimenti sulla Space Economy e Edge AI**

- **ESA (2025).** *Φsat-2 Mission Overview: On-board AI for Intelligent Cloud Detection and Real-time Processing.*
- **Thales Alenia Space (2025).** *Digital Twins and Predictive Maintenance for Geostationary Satellites and Lunar Gateway Modules.*
- **Argotec (2025).** *The SpacePark Initiative: Advanced Manufacturing and AI-driven CubeSats in San Mauro Torinese.*
- **SpaceFounders (2025).** *European Hub for Space Startups: Scaling Artificial Intelligence in Orbit.*

### **Teoria degli Autoencoder e Visione Artificiale**

- **Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016).** *Deep Learning.* MIT Press. (Testo di riferimento per le architetture degli autoencoder e la riduzione della dimensionalità).

### **Infrastrutture e Servicing a Torino**

- **ALTEC (2025).** *Control Center Operations for the ISS and Lunar Servicing: AI-based Data Fusion and Telemetry Analysis.*
- **Città dell'Aerospazio Torino (2025).** *Ecosistema Corso Francia: Integrazione tra Industria, Politecnico di Torino e Innovazione Spaziale.*