

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 Sparavigna¹ e Gemini (Modello Linguistico di Google)²

¹ DISAT, Politecnico di Torino, ² 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 Φ 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 IRIS²), 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%⁵⁵⁵. 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.*