Rete satellitare

Scritto da Febogamedev

Una rete satellitare è un sistema di comunicazione wireless che utilizza uno o più satelliti artificiali per trasmettere dati tra punti diversi della Terra o per collegare utenti e reti terrestri a Internet (Li, 2025; International Telecommunication Union [ITU], 2022).

A differenza delle reti terrestri, nelle quali i dati viaggiano principalmente attraverso cavi, fibra ottica o stazioni radio base, in una rete satellitare una parte del percorso viene effettuata attraverso lo spazio mediante segnali radio.

Le reti satellitari vengono utilizzate per numerosi servizi, tra cui telecomunicazioni, accesso a Internet, trasmissioni televisive, comunicazioni marittime e aeronautiche e collegamenti con aree nelle quali realizzare un'infrastruttura terrestre sarebbe difficile o costoso (ITU, 2022).

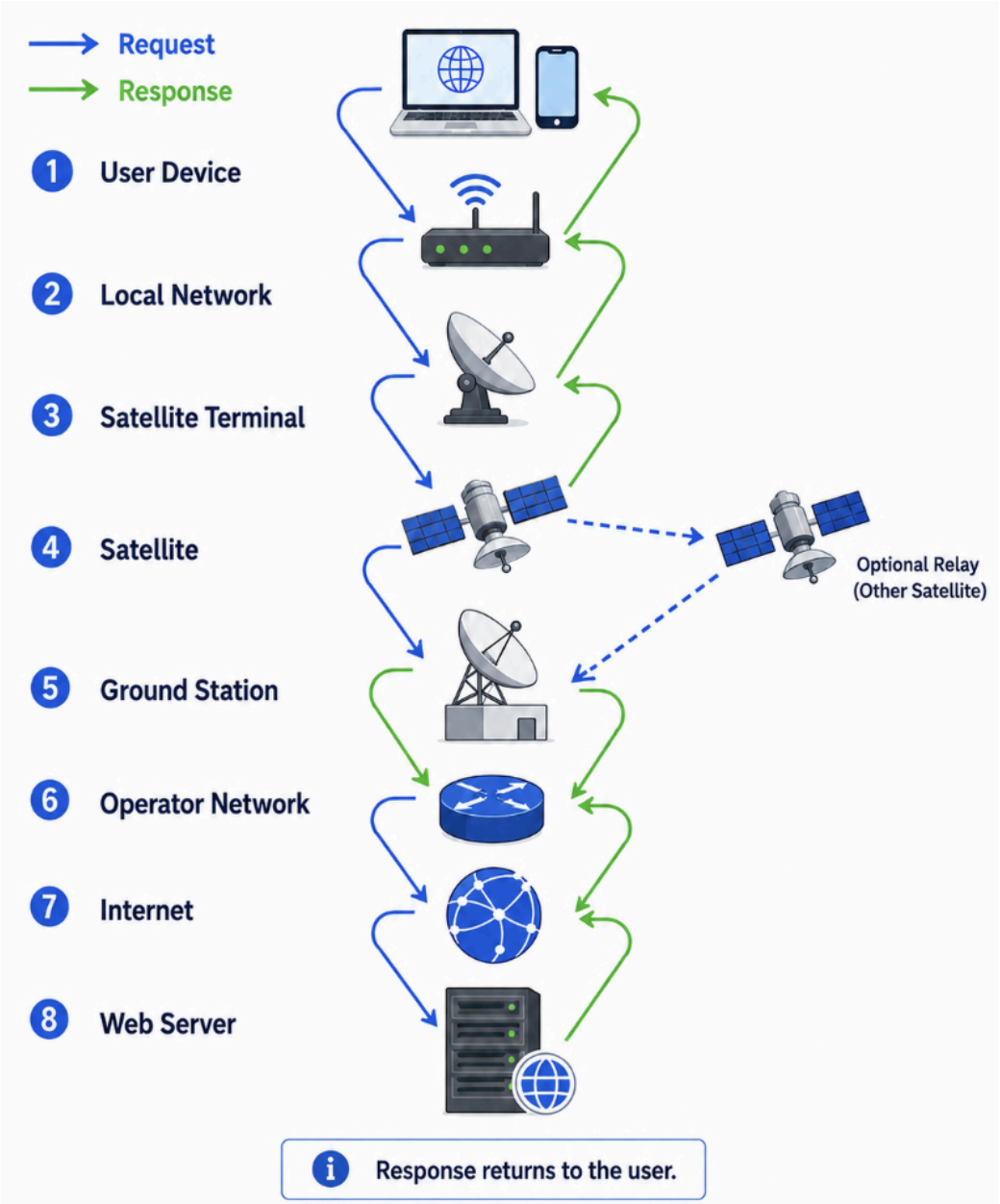
Una rete satellitare per l'accesso a Internet comprende generalmente diversi elementi (Li, 2025):

- Il terminale utente, cioè l'antenna e gli apparati che permettono all'utente di comunicare con il satellite.
- Il satellite, che riceve i segnali e li inoltra verso un'altra parte della rete.
- Le stazioni terrestri o gateway, che collegano la rete satellitare alle infrastrutture di telecomunicazione presenti sulla Terra.
- La rete terrestre, attraverso la quale i dati possono infine raggiungere Internet e la loro destinazione.

Il satellite non deve quindi essere immaginato come un server che contiene i siti richiesti dall'utente (Li, 2025).
Svolge principalmente una funzione di comunicazione e inoltro: permette ai dati di attraversare una parte del percorso tra l'utente e la rete terrestre.

Per comprendere il funzionamento, possiamo considerare un utente che utilizza una connessione satellitare per aprire una pagina web.
Il percorso può essere descritto in modo semplificato nel seguente modo (Li, 2025):

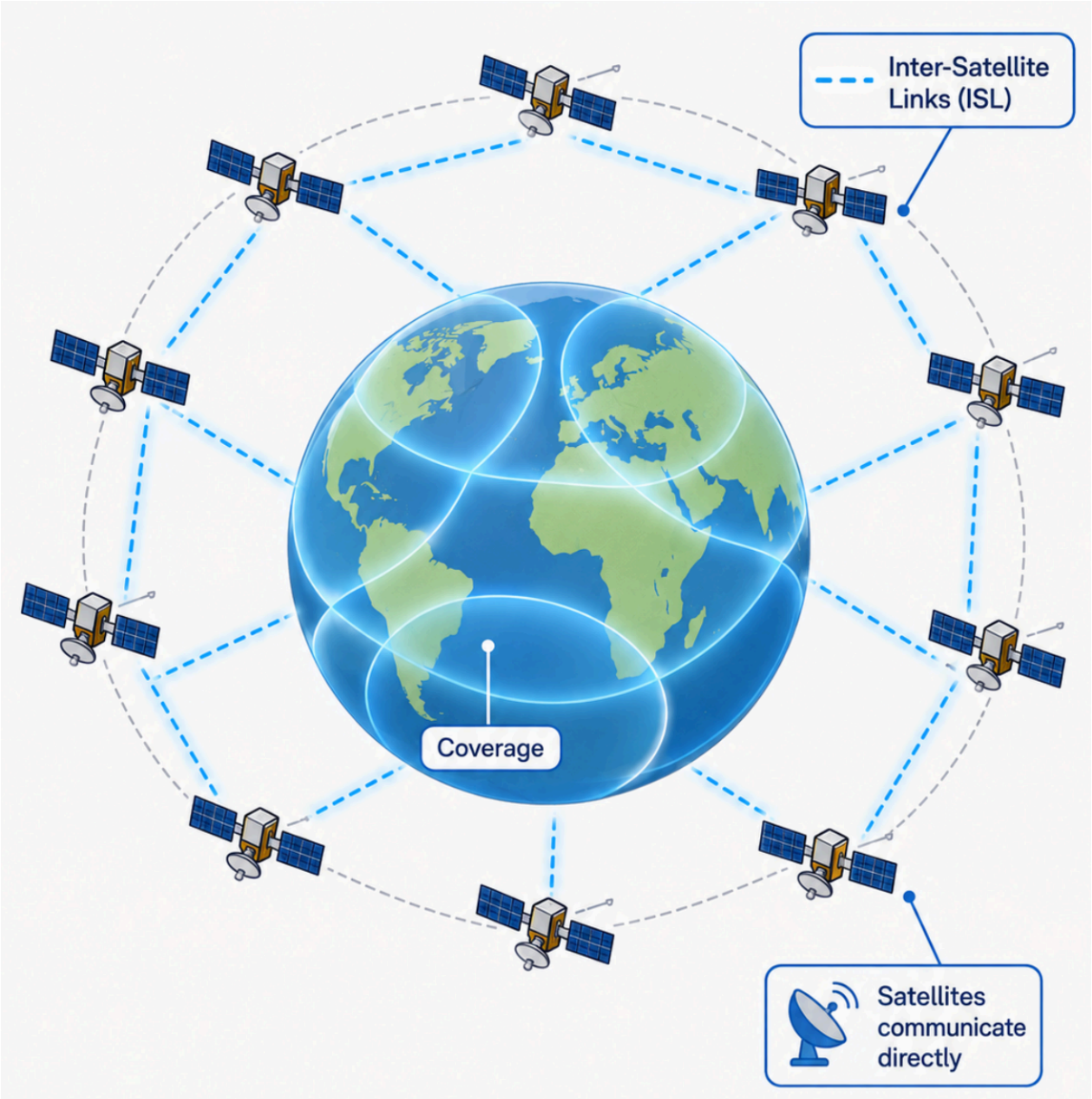
- Il computer o lo smartphone genera la richiesta e la invia attraverso la rete locale al terminale satellitare.
- Il terminale trasforma i dati da trasmettere in un segnale radio e lo invia verso un satellite visibile nel cielo.
- Il satellite riceve il segnale e inoltra i dati.
- I dati possono essere trasmessi direttamente verso una stazione terrestre, oppure, in alcune reti, possono prima essere inoltrati ad altri satelliti.
- La stazione terrestre, chiamata **ground station**, trasferisce quindi i dati alla rete dell'operatore e successivamente a Internet.
- La richiesta raggiunge il server che ospita il sito web.
- La risposta attraversa nuovamente Internet e la rete satellitare fino a raggiungere il terminale dell'utente e infine il suo dispositivo.



In una rete satellitare moderna il percorso non deve necessariamente essere sempre utente → satellite → stazione terrestre (Li, 2025).

Una costellazione satellitare è un insieme di satelliti che operano in modo coordinato per fornire copertura e servizi di comunicazione su una determinata area o, in alcuni casi, su gran parte della Terra (Li, 2025; ITU, 2022).

Alcune costellazioni utilizzano infatti collegamenti intersatellitari (Inter-Satellite Links, *ISL*), attraverso i quali un satellite può comunicare direttamente con altri satelliti della stessa costellazione (Li, 2025).
I dati possono quindi attraversare una parte della costellazione prima di tornare sulla Terra.



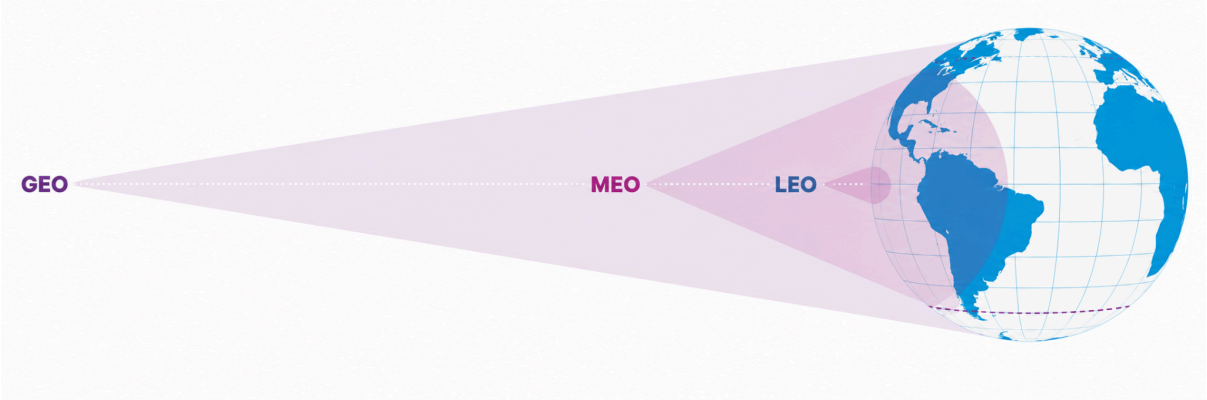
Starlink, una delle reti satellitari più famose, per esempio, utilizza collegamenti ottici basati su laser tra i propri satelliti (Starlink, n.d.-c).
La rete può quindi scegliere, a seconda della posizione, della disponibilità dei collegamenti e della destinazione, se far scendere il traffico verso una stazione terrestre vicina oppure inoltrarlo attraverso altri satelliti della costellazione prima di raggiungere il suolo.

Un elemento fondamentale per comprendere le reti satellitari è la quota dell'orbita, cioè la distanza alla quale il satellite orbita rispetto alla superficie terrestre (NASA Earthdata, n.d.).

Le orbite possono essere suddivise, in modo semplificato, in tre grandi categorie (Allman et al., 1999; NASA Earthdata, n.d.):

- ***LEO* – Low Earth Orbit**: orbita terrestre bassa, generalmente inferiore a circa 2.000 km di quota.
- ***MEO* – Medium Earth Orbit**: orbita intermedia tra le orbite LEO e quella geostazionaria.

- ***GEO* – Geostationary Earth Orbit**: orbita geostazionaria situata a circa 35.786 km sopra l'equatore (NASA Earthdata, n.d.).



I satelliti *GEO* percorrono un'orbita circolare sopra l'equatore e impiegano lo stesso tempo della Terra per completare un giro.
Per questo, osservati dalla superficie, sembrano rimanere fermi nello stesso punto del cielo.

Questa caratteristica è molto utile nelle telecomunicazioni (Allman et al., 1999):

- Un'antenna terrestre può essere orientata verso una posizione fissa (la parabola può essere installata una volta, orientata verso quella posizione e non deve inseguire il satellite).
- Un singolo satellite può coprire una porzione molto ampia della superficie terrestre (osservate l'immagine in alto per intuirne l'estensione).

La grande distanza dalla Terra presenta però uno svantaggio: il segnale deve percorrere decine di migliaia di chilometri per raggiungere il satellite e altrettanti per tornare verso la superficie (Allman et al., 1999).
La propagazione del segnale introduce quindi un ritardo significativo.

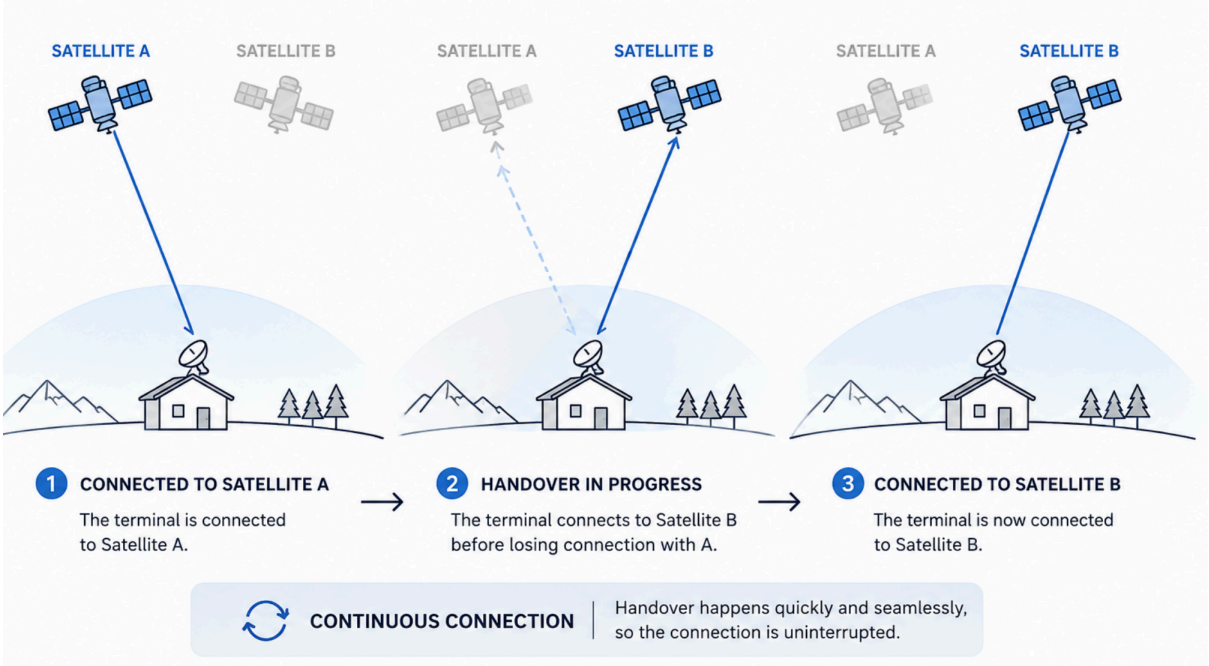
I satelliti *LEO*, al contrario, orbitano molto più vicino alla superficie terrestre.
La distanza minore riduce il tempo necessario al segnale per viaggiare tra Terra e satellite e permette quindi di ottenere un ritardo inferiore (Allman et al., 1999).
Esiste però una conseguenza importante: un satellite *LEO* non rimane fermo sopra la stessa zona.

Dal punto di vista dell'utente, il satellite attraversa rapidamente il cielo; il terminale deve quindi seguirne elettronicamente il movimento oppure passare periodicamente a un altro satellite della costellazione.
Per garantire un collegamento continuo è quindi necessario utilizzare costellazioni (Allman et al., 1999).
Starlink utilizza proprio questo principio: invece di affidarsi a pochi satelliti geostazionari molto lontani dalla Terra, utilizza una grande costellazione di satelliti collocati in orbita terrestre bassa, a poche centinaia di chilometri dalla superficie (Starlink, n.d.-c).

Questa scelta permette di ridurre fortemente la distanza percorsa dal segnale.

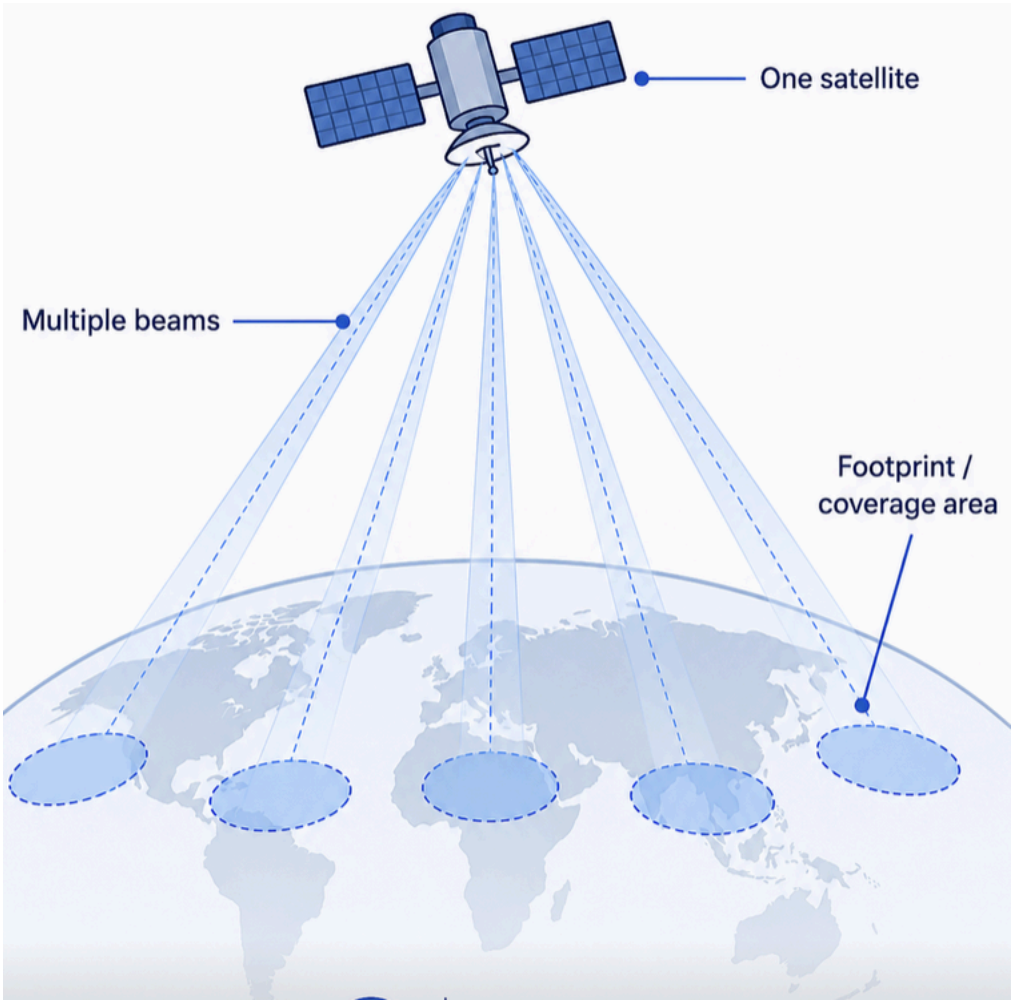
Secondo le specifiche pubblicate da Starlink, per gli utenti terrestri il ritardo del servizio si colloca tipicamente nell'ordine di alcune decine di millisecondi, anche se può variare in funzione della posizione, del carico della rete e del percorso seguito dai dati (Starlink, n.d.-b).

La situazione presenta alcune analogie con ciò che avviene nelle reti mobili.
In una rete mobile un dispositivo che si sposta può passare progressivamente da una cella a un'altra.
In una rete satellitare *LEO* può accadere qualcosa di concettualmente simile, ma è spesso il satellite a muoversi rapidamente rispetto all'utente (non il cellulare come nelle reti mobili).
Il terminale deve quindi passare periodicamente dalla comunicazione con un satellite alla comunicazione con un altro satellite disponibile.
Questo processo viene chiamato **handover satellitare**.
L'handover satellitare (o handoff) è il processo con cui una connessione viene trasferita da un satellite, un fascio di copertura o un collegamento a un altro cercando di mantenere la continuità del servizio (Allman et al., 1999).



Nel caso di Starlink, il terminale può avere diversi satelliti disponibili e il sistema seleziona dinamicamente quello più adatto (Li, 2025; Starlink, n.d.-c).
Poiché i satelliti *LEO* attraversano rapidamente il cielo, questi cambiamenti possono avvenire molte volte durante il normale funzionamento della connessione.

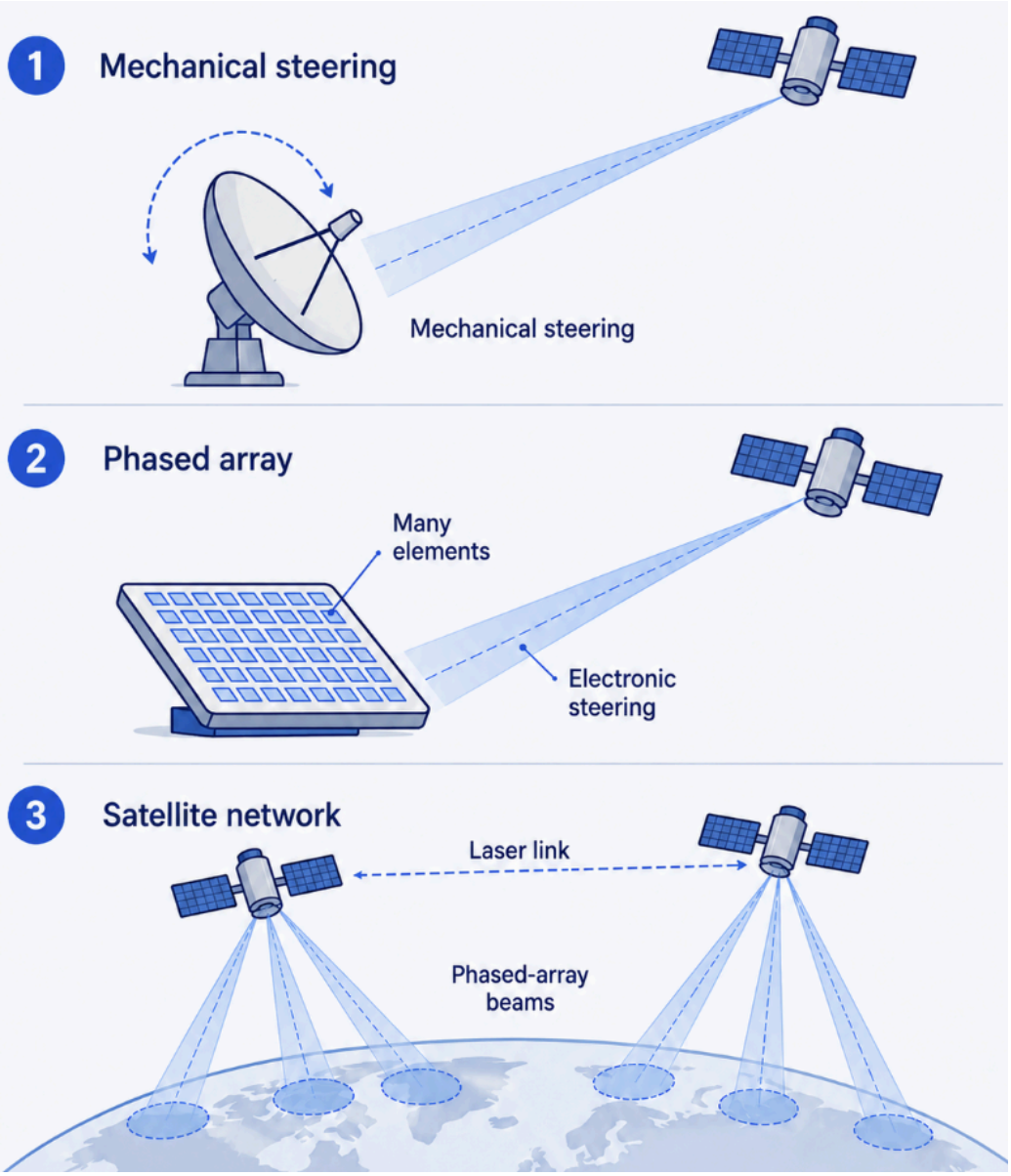
La copertura di un satellite non viene normalmente descritta attraverso una singola "cella" come nelle reti cellulari terrestri.
Un satellite utilizza antenne che generano uno o più fasci radio (beam).
Ogni beam illumina una determinata area della superficie terrestre, chiamata *footprint*.
Un satellite può generare più beam e quindi servire contemporaneamente diverse aree.



Un singolo satellite può produrre più fasci e riutilizzare le proprie risorse radio in zone differenti (Starlink, n.d.-c).
Nelle costellazioni *LEO* la configurazione della copertura cambia continuamente perché i satelliti si muovono rispetto alla superficie terrestre.

Per questo motivo la rete deve conoscere costantemente la posizione dei satelliti, dei terminali e delle stazioni terrestri e decidere quali collegamenti utilizzare (Li, 2025).

Anche le antenne utilizzate sono differenti dalle tradizionali parabole satellitari fisse.
I terminali Starlink, per esempio, utilizzano antenne **phased array,** costituite da numerosi elementi radianti controllati elettronicamente (Starlink, n.d.-c).
A differenza di un'antenna che deve essere orientata meccanicamente verso il satellite, un'antenna phased array può modificare elettronicamente la direzione del fascio radio senza ruotare continuamente l'intera antenna (Starlink, n.d.-c).
Anche i satelliti Starlink utilizzano antenne phased array e diverse bande di frequenza, mentre i collegamenti tra satelliti possono utilizzare comunicazioni ottiche tramite laser (Starlink, n.d.-c).



Come per le reti mobili, anche le comunicazioni satellitari utilizzano porzioni dello spettro elettromagnetico regolamentate (ITU, 2022).
Le frequenze disponibili devono essere coordinate affinché sistemi diversi possano funzionare senza produrre interferenze dannose (ITU, 2022).

La qualità del collegamento non dipende però soltanto dalla distanza dal satellite.
Poiché il terminale deve comunicare con oggetti presenti nel cielo, è particolarmente importante che disponga di una visuale sufficientemente libera.
Alberi, edifici, montagne o altre strutture possono ostacolare il percorso del segnale (Allman et al., 1999).
Nelle costellazioni composte da molti satelliti il sistema può in alcuni casi cambiare satellite per evitare un collegamento temporaneamente ostruito, ma una posizione fortemente chiusa verso il cielo può comunque compromettere la connessione.

Anche le condizioni atmosferiche possono influenzare la propagazione. Pioggia intensa, neve e grandine possono attenuare i segnali radio e provocare temporanei peggioramenti del servizio (ITU, 2023).
La connessione satellitare condivide inoltre una parte della propria capacità tra diversi utenti. La velocità disponibile non dipende quindi esclusivamente dalla tecnologia del terminale, ma anche dal numero di utenti serviti, dalla capacità dei satelliti e dei gateway, dalla posizione geografica e dalla congestione della rete (Li, 2025; Starlink, n.d.-b).

Le reti satellitari presentano quindi vantaggi e limiti differenti rispetto alle infrastrutture terrestri.
Il principale vantaggio è la possibilità di raggiungere luoghi nei quali non sono disponibili collegamenti terrestri adeguati (ITU, 2022).

- Per portare una connessione in una casa isolata, in una nave, in una zona montana o in un territorio scarsamente popolato può essere necessario costruire chilometri di fibra ottica o realizzare nuove stazioni radio base.
- Una rete satellitare permette invece di realizzare una parte significativa del collegamento attraverso lo spazio, richiedendo principalmente la presenza del terminale e una sufficiente visibilità del cielo (ITU, 2022).

Questo rende le reti satellitari particolarmente interessanti come rete di accesso, cioè come collegamento tra l'utente e l'infrastruttura dell'operatore (Li, 2025).

Non significa però che i satelliti sostituiscano completamente Internet terrestre.
Quando il traffico torna sulla Terra, infatti, può proseguire attraverso punti di presenza, data center, router, dorsali in fibra ottica e altre infrastrutture tradizionali (Li, 2025).
La rete satellitare costituisce quindi una parte di un sistema di comunicazione più ampio.

Starlink rappresenta un esempio significativo di questa integrazione: il terminale dell'utente comunica con la costellazione satellitare, ma la costellazione è a sua volta collegata a una rete terrestre di gateway e punti di presenza che permettono di raggiungere Internet (Li, 2025; Starlink, n.d.-c).

Infine, reti mobili e reti satellitari possono integrarsi per estendere la connettività anche in aree non raggiunte dalle normali stazioni radio base (3rd Generation Partnership Project [3GPP], 2024).
La comunicazione satellite-to-phone, chiamata anche **Direct-to-Device (*D2D*)**, è una comunicazione in cui un normale telefono cellulare comunica direttamente con un satellite, senza passare prima da una stazione radio base terrestre (3GPP, 2024; Starlink, n.d.-a).
Il satellite svolge quindi, in parte, un ruolo simile a quello di una stazione radio base nello spazio.

Starlink Direct to Cell è un esempio di questo tipo di tecnologia: alcuni satelliti Starlink funzionano come stazioni radio base nello spazio e possono collegarsi direttamente a telefoni cellulari compatibili (Starlink, n.d.-a).
In questo caso reti mobili e reti satellitari non sono più sistemi completamente separati, ma possono diventare parti integrate della stessa infrastruttura di comunicazione (3GPP, 2024).

Materiale di supporto

Esercizi

Da casa a Internet attraverso Starlink
Luca vive in una zona montana nella quale non è disponibile una connessione in fibra ottica. Utilizza quindi Starlink per collegarsi a Internet.
Apre il browser e visita il sito web della scuola.

Ricostruisci il percorso seguito dai dati.

- Individua quale dispositivo permette alla rete locale di Luca di comunicare con la rete satellitare.
- Spiega come i dati vengono trasmessi dal terminale verso il satellite.
- Spiega quale funzione svolge il satellite nel percorso della richiesta.
- Descrivi il ruolo di una stazione terrestre o gateway.
- Spiega come la richiesta può raggiungere Internet dopo essere tornata sulla Terra.
- Descrivi il percorso inverso seguito dalla risposta del server.
- Spiega come il percorso potrebbe cambiare se venissero utilizzati collegamenti intersatellitari.
- Spiega perché non è corretto affermare che il sito web richiesto da Luca si trova "sul satellite".

GEO o LEO?
Due operatori vogliono fornire una connessione Internet via satellite.

- L'operatore A utilizza un piccolo numero di satelliti geostazionari.
- L'operatore B utilizza invece una grande costellazione di satelliti in orbita terrestre bassa.

Confronta le due soluzioni.

- Spiega la differenza fondamentale tra un'orbita GEO e un'orbita LEO.
- Spiega perché un satellite GEO può rimanere apparentemente fermo nello stesso punto del cielo.
- Spiega perché un satellite GEO può coprire un'area geografica molto ampia.
- Spiega perché la maggiore distanza di un satellite GEO aumenta la latenza della comunicazione.
- Spiega perché una rete LEO necessita generalmente di molti più satelliti.
- Spiega perché un terminale collegato a una costellazione LEO deve cambiare periodicamente satellite.
- Indica quale delle due soluzioni può essere più adatta ad applicazioni interattive sensibili alla latenza e motiva la risposta.
- Spiega perché non è possibile stabilire quale sistema sia "migliore" in assoluto senza conoscere gli obiettivi e i requisiti della rete.

Progettare la connessione di un rifugio
Un rifugio si trova in una zona montana lontana dai centri abitati.

Non è raggiunto dalla fibra ottica, il segnale della rete mobile è molto debole e la realizzazione di un nuovo collegamento terrestre sarebbe costosa.
Si valuta quindi l'utilizzo di una rete satellitare LEO.

Analizza la situazione.

- Spiega perché una connessione satellitare potrebbe essere adatta a questo contesto.
- Indica quali componenti sarebbero necessari nel rifugio per collegare i dispositivi degli utenti a Internet.
- Spiega perché la posizione dell'antenna dovrebbe avere una buona visuale del cielo.
- Individua alcuni ostacoli naturali o artificiali che potrebbero compromettere il collegamento.
- Spiega perché neve e condizioni atmosferiche intense potrebbero influenzare le prestazioni.
- Spiega perché la velocità disponibile potrebbe diminuire quando molti utenti utilizzano contemporaneamente la stessa infrastruttura satellitare.
- Confronta questa soluzione con la realizzazione di un collegamento in fibra, considerando costi di installazione, prestazioni, latenza e difficoltà di raggiungere il territorio.
- Motiva infine se utilizzeresti la rete satellitare come collegamento principale, come collegamento di emergenza o come combinazione delle due soluzioni.

Bibliografia

3rd Generation Partnership Project. (2024). *Non-terrestrial networks (NTN)*. https://www.3gpp.org/technologies/ntn-overview

Allman, M., Glover, D., & Sanchez, L. (1999). *Enhancing TCP over satellite channels using standard mechanisms* (BCP 28, RFC 2488). RFC Editor. https://doi.org/10.17487/RFC2488

International Telecommunication Union. (2022). *Regulation of satellite systems*. https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/Regulation-of-Satellite-Systems.aspx

International Telecommunication Union. (2023). *Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems* (Recommendation ITU-R P.618-14). https://www.itu.int/rec/R-REC-P.618/en

Li, T. (2025). *A routing architecture for satellite networks* (RFC 9717). RFC Editor. https://doi.org/10.17487/RFC9717

NASA Earthdata. (n.d.). *Orbits*. https://www.earthdata.nasa.gov/learn/earth-observation-data-basics/orbits

Starlink. (n.d.-a). *Starlink Mobile*. https://starlink.com/business/mobile

Starlink. (n.d.-b). *Starlink specifications*. https://starlink.com/legal/documents/DOC-1470-99699-90

Starlink. (n.d.-c). *Technology*. https://starlink.com/it/technology

Approfondimenti

- Angelo Bernardini, Radiocomunicazioni terrestri e satellitari, Edizioni Efesto, 2026 — Offre una trattazione ampia e aggiornata delle radiocomunicazioni, approfondendo trasmissione radio, modulazione, multiplazione, accesso multiplo e principi necessari per comprendere il funzionamento dei collegamenti terrestri e satellitari.
- Italo Ghidini, Sistemi di comunicazioni satellitari, Aracne, 2008 — È il testo più specificamente dedicato agli argomenti della dispensa: descrive la struttura dei sistemi satellitari, il collegamento tra Terra e satellite, la propagazione, le antenne, i segnali, le stazioni terrestri e la piattaforma satellitare, affrontando sia sistemi fissi sia mobili.
- Emilio Matricciani, Meccanica celeste e orbite dei satelliti, Esculapio, 2017 — Approfondisce gli aspetti orbitali alla base delle telecomunicazioni satellitari ed è particolarmente utile per comprendere perché quota, periodo e caratteristiche dell'orbita influenzino copertura, movimento dei satelliti e funzionamento dei sistemi *LEO*, *MEO* e *GEO*.
- Alessandro Falaschi, Sistemi di telecomunicazione, Youcanprint, 2023 — Approfondisce i principi fisici e ingegneristici della trasmissione, tra cui canale radio, bilancio di collegamento, rumore, modulazione, antenne e comunicazioni via satellite, collegando questi temi al funzionamento generale delle reti di telecomunicazione.
- Filippo Giannetti, Fabrizio Lombardini, Marco Moretti e Luca Sanguinetti, Esercizi di sistemi di telecomunicazione, Edizioni ETS, 2005 — Propone problemi svolti basati su sistemi reali di telecomunicazione e dedica un capitolo specifico ai sistemi satellitari, con esercizi sui parametri orbitali e sul dimensionamento dei collegamenti satellite-Terra. È particolarmente utile per passare dalla comprensione concettuale all'applicazione quantitativa.

Nota editoriale

Per la realizzazione di questi materiali ho utilizzato strumenti di intelligenza artificiale generativa come supporto alla scrittura, in particolare per migliorare la forma del testo, riorganizzare i contenuti, correggere la formulazione e velocizzare alcune attività redazionali.

Lavorando autonomamente alla produzione di questi materiali, cerco infatti di automatizzare tutte le attività che possono esserlo, così da poter dedicare più tempo alla ricerca, alla progettazione e allo sviluppo dei contenuti.

L'intelligenza artificiale non determina però i contenuti dell'opera: la scelta degli argomenti, la struttura, le idee, le interpretazioni, gli esempi e l'impostazione didattica sono elaborati da me. L'IA viene quindi utilizzata principalmente come strumento di supporto alla produzione e alla revisione formale, mentre la responsabilità autoriale e progettuale dei contenuti rimane mia.

Salvo diversa indicazione, questo materiale è distribuito con licenza Creative Commons Attribuzione – Non commerciale – Condividi allo stesso modo 4.0 Internazionale (CC BY-NC-SA 4.0).

È quindi possibile condividere, ridistribuire, modificare e creare opere derivate a partire dal materiale, a condizione di attribuirne correttamente la paternità, di non utilizzarlo per scopi commerciali e di distribuire eventuali versioni modificate o derivate con la stessa licenza.

