

UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



LAUREA IN INGEGNERIA INFORMATICA

## Funzionamento della rete satellitare Starlink

CANDIDATO

**Matteo Galiazzo**

Matricola 2044941

RELATORE

**Prof. Roberto Corvaja**

Università di Padova

ACADEMIC YEAR  
2023/2024



## **Abstract**



# Contents

<b>List of Figures</b>	<b>xi</b>
<b>List of Acronyms</b>	<b>xix</b>
<b>1 Tipi di costellazioni satellitari</b>	<b>1</b>
1.1 Vantaggi della Low Earth Orbit . . . . .	1
<b>2 Architettura del sistema</b>	<b>3</b>
2.1 Segmento spaziale . . . . .	3
2.2 Segmento di terra . . . . .	4
2.3 Segmento utente . . . . .	4
2.3.1 Antenna . . . . .	4
<b>References</b>	<b>11</b>



# List of Figures

2.1	Architettura di sistema [5] . . . . .	4
2.2	Aperture Couple Patch antenna [1] . . . . .	5
2.3	Aperture Couple Patch antenna con un segnale applicato [1] . . .	7
2.4	Creazione dei campi di frangia in un'Aperture Couple Patch antenna [1] . . . . .	7
2.5	Campo elettromagnetico in un'Aperture Couple Patch antenna [1]	8



# List of Acronyms

**LEO** Low Earth Orbit

**GEO** Geostationary Earth Orbit

**Ku** K under

**Ka** K above

**MEO** Medium Earth Orbit

**ISL** Inter Satellite Link

**ISP** Internet Service Provider



# 1

## Tipi di costellazioni satellitari

Una costellazione di Internet via satellite è una costellazione di satelliti artificiali che forniscono servizi di Internet via satellite. In particolare, il termine si riferisce a una nuova generazione di costellazioni molto grandi (a volte indicate come megacostellazioni) che orbitano nell'orbita terrestre bassa (LEO) per fornire servizi Internet a bassa latenza e ad alta larghezza di banda (banda larga). [3] Nel 2020, il 63% delle famiglie che vivono in zone rurali del mondo non ha accesso a internet a causa dei requisiti infrastrutturali dei cavi sotterranei e delle torri di rete. Le costellazioni internet via satellite offrono una soluzione a basso costo per espandere la copertura. [4]

### 1.1 VANTAGGI DELLA LOW EARTH ORBIT

I satelliti sono tipicamente lanciati in una di tre orbite: Low Earth Orbit (LEO) dai 160 ai 2'000 km, Medium Earth Orbit (MEO) dai 2'000 ai 35'786 km, o Geosynchronous Orbit (GEO) a 42,164 km. Ciascuna delle tre orbite ha i suoi vantaggi. Per esempio, una costellazione in GEO può avere copertura globale con solo tre satelliti per la sua distanza dalla superficie terrestre. La GEO è popolare per le comunicazioni per questo motivo. Però, dato che i satelliti sono così distanti dalla Terra la latenza è molto alta.

Le nuove generazioni di internet via satellite piazzano i satelliti in LEO invece della tradizionale GEO per una serie di motivi. Infatti i satelliti lanciati in LEO:

### 1.1. VANTAGGI DELLA LOW EARTH ORBIT

- sono tipicamente più piccoli e più leggeri di quelli in GEO, quindi serve meno carburante per mandarli in orbita.
- dato che i satelliti sono più vicini i terminali utente possono rilevare più satelliti allo stesso tempo e conettersi con precisione maggiore[4].

# 2

## Architettura del sistema

Chiariamo come prima cosa la differenza tra un antenna per la televisione satellitare e un'antenna Starlink. Le parabole TV utilizzano un riflettore parabolico per focalizzare le onde elettromagnetiche che costituiscono i segnali televisivi inviati dai satelliti di trasmissione in orbita attorno alla terra a un'altitudine di 35'000 km. Le parabole TV ricevono solo segnali televisivi dallo spazio, non possono inviare dati. La parabola Starlink, invece, invia e riceve dati Internet da un satellite starlink in orbita a 550km di distanza. I fasci tra la parabola Starlink e il satellite devono essere concentrati in fasci potenti e stretti, continuamente orientati per puntare l'uno verso l'altro [1]. Attualmente ci sono 6398 satelliti Starlink in orbita [2].

### 2.1 SEGMENTO SPAZIALE

Questo segmento è costituito da un numero di satelliti in Low Earth Orbit (LEO). Si tratta di piccoli satelliti a basso costo che pesano circa 260kg (nella versione 1.0), operano in K under (Ku) e K above (Ka) band e hanno durata di vita di 5-7 anni. [5] Questi satelliti collegano l'utente a Internet.

Poichè esiste un numero enorme di satelliti questi comunicano tra loro attraverso Inter Satellite Link (ISL).

TODO: AGGIUNGERE PAPER ISL OTTICO

## 2.2. SEGMENTO DI TERRA

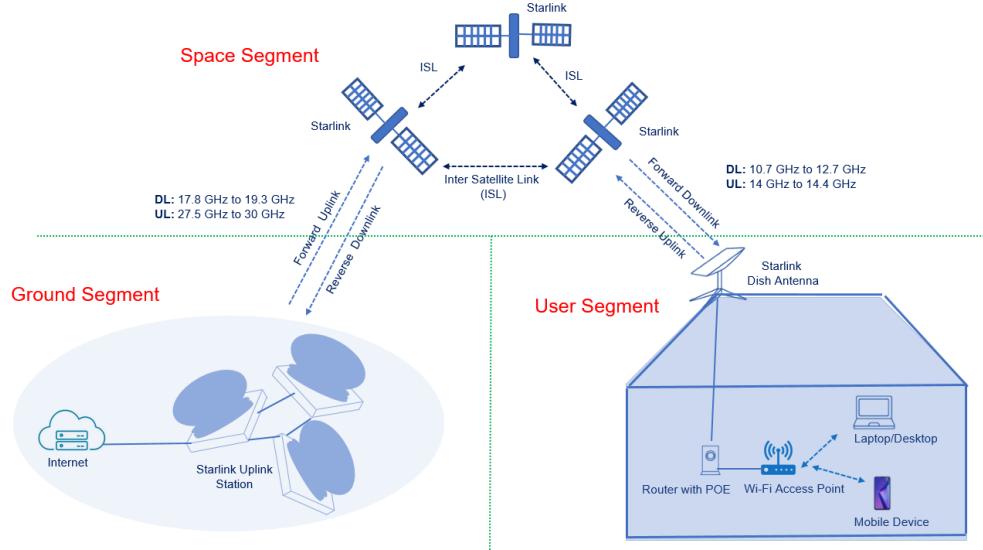


Figure 2.1: Architettura di sistema [5]

## 2.2 SEGMENTO DI TERRA

I segmenti di terra includono diverse facilities che gestiscono la rete e forniscono connettività internet ai satelliti. Questi funzionano anche da Graund Station e sono localizzati strategicamente intorno al mondo per fornire copertura a zone remote e con poca connettività a internet. La ground station è connessa all'Internet Service Provider (ISP) tramite fibra.

## 2.3 SEGMENTO UTENTE

Il segmento utente comprende l'area in cui le persone utilizzano i servizi internet tramite il kit che viene fornito e che comprende l'antenna per la trasmissione, il cavo di alimentazione, il router (tranne nella versione mini dell'antenna dove il router è integrato all'antenna) e il cavo di rete per connettere l'antenna al router se quest'ultimo è incluso.

### 2.3.1 ANTENNA

#### STRUTTURA GENERALE

Aprendo la parabola (versione 1.0 revisione 2) troviamo sul retro una coppia di motori e un cavo ethernet che si collega al router. Questi motori non muovono

continuamente la parabola per puntare direttamente al satellite con cui comunica; vengono utilizzati solo durante la configurazione iniziale per orientare l'antenna nella direzione generale corretta. Aprendo la parabola troviamo una piastra posteriore strutturale in alluminio e, dall'altro lato, una grande scheda a circuiti stampati (PCB). Su un lato ci sono 640 microchip piccoli e 20 microchip più grandi, disposti in un pattern con tracce che si diramano dai microchip più grandi a quelli più piccoli, insieme a chp aggiuntivi, inclusa la CPU principale e il modulo GPS sul bordo del PCB. Sull'altro lato ci sono circa 1'400 cerchi di rame con una griglia di quadrati tra i cerchi. Nel livello successivo c'è uno schema a nido d'ape in gomma con piccoli cerchi di rame intagliati e dietro troviamo un altro schema a nido d'ape e poi la copertura anteriore della parabola. Abbiamo quindi 1280 antenne disposte in un pattern esagonale a nido d'ape, con ciascuna pila di cerchi di rame che rappresenta una singola antenna controllata dai microchip sul PCB. Questo enorme array funziona insieme in quella che è chiamata un'antenna phased array per inviare e ricevere onde elettromagnetiche che vengono direzionate verso e da un satellite Starlink in orbita a 550km di distanza.

#### FUNZIONAMENTO DELL'ANTENNA APERTURE COUPLE PATCH

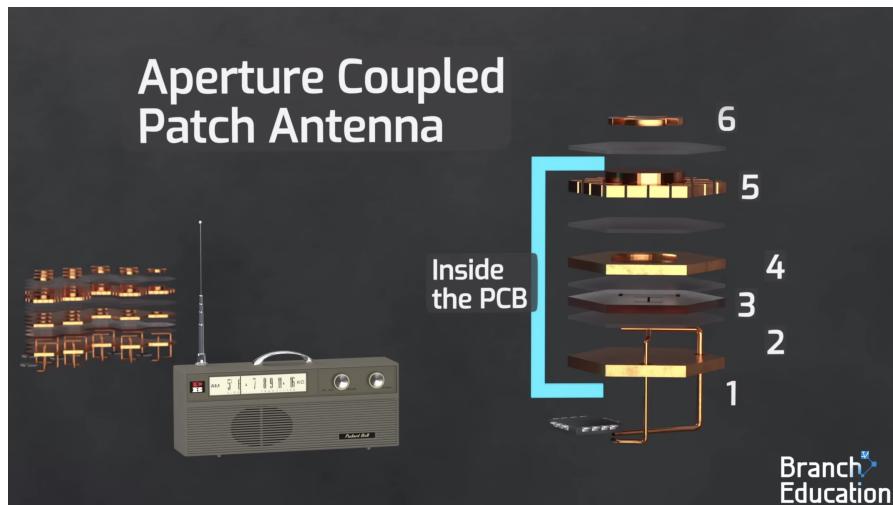


Figure 2.2: Aperture Couple Patch antenna [1]

Nella figura 2.2 possiamo vedere un'aperture couple patch antenna, composta di 6 layer, il più dei quali all'interno del PCB. I layer più importanti sono:

- 1 linea di alimentazione.

### 2.3. SEGMENTO UTENTE

- 2 piano RF reflective.
- 3 H slot per la polarizzazione.
- 4 isolamento dell'antenna.
- 5 Bottom antenna patch: trasmettitore a 13 GHz.
- 6 Top antenna patch: ricevitore a 11.7 GHz.

I pezzi esagonali grigio scuro invece sono isolamento elettrico tra i vari layer.

Per semplificare la sua compressione semplifichiamola rimuovendo per il momento alcuni layer per semplificare la sua comprensione, e vediamo i principi base di come si genera un'onda elettromagnetica che si propaga da quest'antenna.

Per iniziare, sul fondo abbiamo una micro linea di trasmissione elettrica che arriva da uno dei piccoli microchip. Questa linea di trasmissione è solo un filo di rame che termina sotto la pila dell'antenna. Mandiamo una tensione sinusodiale alla frequenza di 12 GHz al filo di alimentazione, che vuol dire che il segnale passa da positivo a negativo ogni 83 pico secondi. Al di sopra del filo di rame di alimentazione abbiamo un cerchio di rame con intagli chiamato patch d'antenna.

Con la corrente continua o alternata a bassa frequenza, non succederebbe molto perchè il patch è isolato, ma con un segnale ad alta frequenza la potenza inviata al filo di alimentazione viene accoppiata o inviata al patch. Questo fenomeno avviene perchè quando la tensione è al fondo della sua sinusoide, o al minimo, c'è una concentrazione di elettroni spinti verso l'estremità del filo di alimentazione, creando così una zona di carica negativa che corrisponde alla massima tensione negativa. Questa concentrazione di elettroni sulla punta del filo respinge tutti gli elettroni, compresi quelli sulla parte superiore del patch, e di conseguenza questi elettroni vengono spinti verso l'altro lato del patch circolare. In questo modo, un lato del patch diventa carico positivamente, mentre l'altro diventa carico negativamente, creando così campi elettrici tra il patch e il filo di alimentazione. Tuttavia, quando invertiamo la tensione al filo di rame 42 picosecondi dopo, abbiamo una concentrazione di cariche positive, o una mancanza di elettroni all'estremità del filo, e quindi gli elettroni nel patch fluiscono verso l'altro lato, la tensione nel patch è invertita e anche la direzione dei campi elettrici è invertita.

Poiché la tensione del filo di alimentazione oscilla con un intervallo di 42 picosecondi tra un picco e un avvallamento, anche i campi elettrici nel patch oscillatoranno mentre gli elettroni vanno avanti e indietro.

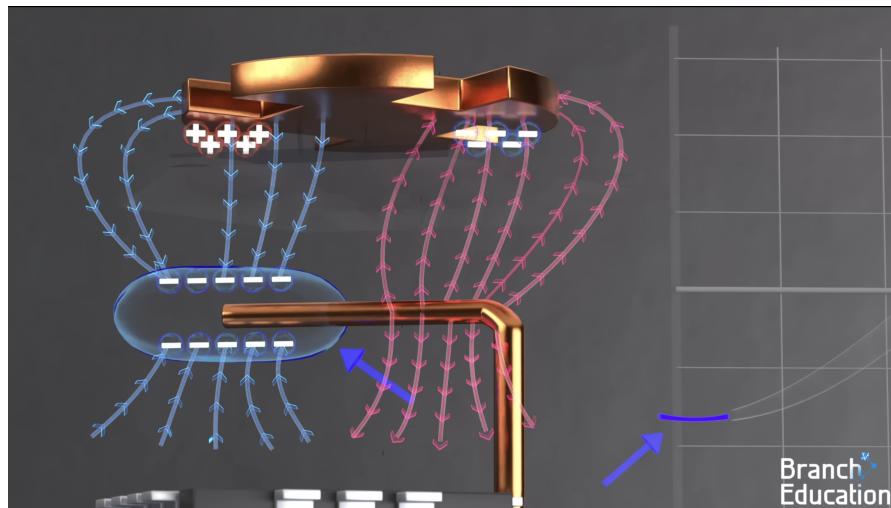


Figure 2.3: Aperture Couple Patch antenna con un segnale applicato [1]

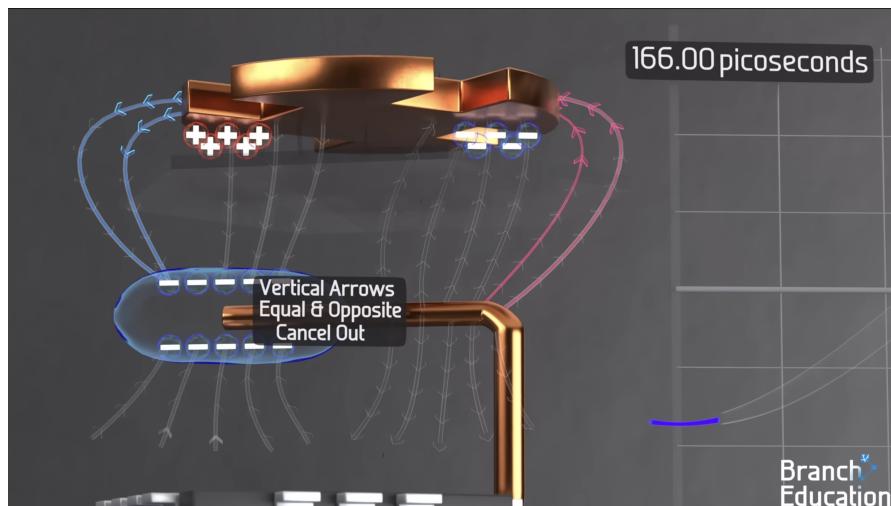


Figure 2.4: Creazione dei campi di frangia in un'Aperture Couple Patch antenna [1]

### 2.3. SEGMENTO UTENTE

Possiamo vedere in figura 2.4 che alcuni di questi vettori di campo elettrico provenienti dal patch sono verticali e, poiché sono uguali e opposti, si annullano. Tuttavia, altri campi elettrici sono orizzontali nello stesso piano del patch e sono chiamati campi di frangia. Questi campi di frangia sono nella stessa direzione e quindi si sommano l'uno all'altro, dando luogo a un campo elettrico combinato.

Allo stesso tempo, gli elettroni che scorrono da un lato all'altro del disco, che costituiscono una corrente elettrica, generano un campo magnetico con un'intensità e una direzione, o vettore, perpendicolare al vettore del campo elettrico di frangia. Di conseguenza, abbiamo un campo elettrico orientato in un senso e un campo magnetico orientato perpendicolarmente, come si può vedere in figura 2.5.

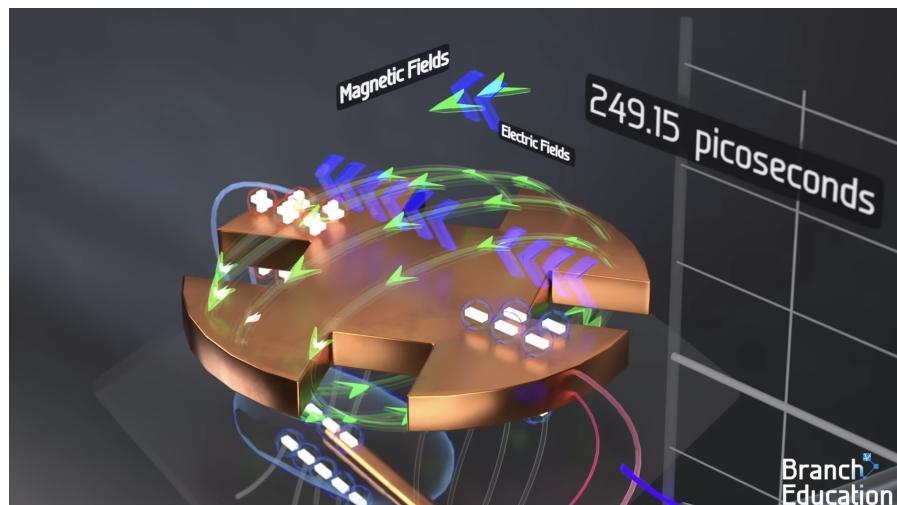


Figure 2.5: Campo elettromagnetico in un'Aperture Couple Patch antenna [1]

42 picosecondi dopo, quando la tensione sulla linea di alimentazione diventa positiva, e siamo al picco della sinusoide, la tensione e la corrente sono invertite. Quindi il campo elettrico e quello magnetico puntano alla direzione opposta.

### EMISSIONE DELLE ONDE ELETTRONAGNETICHE

Creando i campi elettromagnetici oscillanti vengono generate onde elettromagnetiche che viaggiano in direzione perpendicolare al campo elettrico e al campo magnetico. Dato che i due insiemi di campi non sono tutti sullo stesso piano, ma sono curvati, l'onda elettromagnetica che si propaga viaggia verso l'esterno in una forma di guscio che si espande.

L'intensità di questi campi è legata direttamente alla tensione che è stata originariamente mandata alla linea di alimentazione alla base dell'antenna. Questo significa che se vogliamo rendere questi campi elettromagnetici più intensi basta aumentare la tensione inviata alla linea di alimentazione.

Per ricevere il segnale basta switchare il microchip dell'antenna, chiamato modulo front-end, che si vede in figura 2.2 da modalità trasmettitore a modalità ricevitore.

**TODO: MIGLIORARE SPIEGAZIONE RICEZIONE ONDA ELETTROMAGNETICA**

Quando un'onda elettromagnetica dal satellite è diretta verso l'antenna, i campi elettromagnetici del segnale in arrivo influenzano gli elettroni nel patch di rame, generando un flusso di elettroni.

Questo segnale ad alta frequenza ricevuto è inviato alla feedlite dove il modulo di front-end che amplifica il segnale. Quindi, queste antenne possono essere usate sia per trasmettere che per ricevere onde elettromagnetiche, ma non allo stesso tempo.

**BEAMFORMING: COME FORMARE UN FASCIO DI ONDE ELETTROMAGNETICHE CHE RAGGIUNGE LO SPAZIO**



# References

- [1] Branch Education. *How does Starlink Satellite Internet Work?* Aug. 2022. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=qs2QcycggWU>.
- [2] Jonathan McDowell. *Starlink Launch Statistics*. URL: <https://planet4589.org/space/con/star/stats.html>.
- [3] Jose Del Rosario. *NSR Reports China's Ambitious Constellation of 300 Small Satellites in LEO*. Mar. 2018. URL: <http://www.satnews.com/story.php?number=257303683>.
- [4] Makena Young and Akhil Thadani. *Low Orbit, High Stakes All-In on the LEO Broadband Competition*. Dec. 2022.
- [5] Techplayon. *SpaceX - Starlink System Architecture for Internet*. Jan. 2024. URL: <https://www.techplayon.com/starlink-system-architecture/>.