

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale
***«Configurazione dell'architettura orbitale della
costellazione Starlink e i suoi effetti sull'ambiente spaziale»***

Tutor universitario: Prof. Carlo
Bettanini Fecia di Cossato

Laureando: *Ilaria Michelon 1217886*

Padova, 18/09/2024

24 maggio 2019 : primo lancio dei satelliti operativi Starlink, la più grande costellazione satellitare per le telecomunicazioni mai realizzata

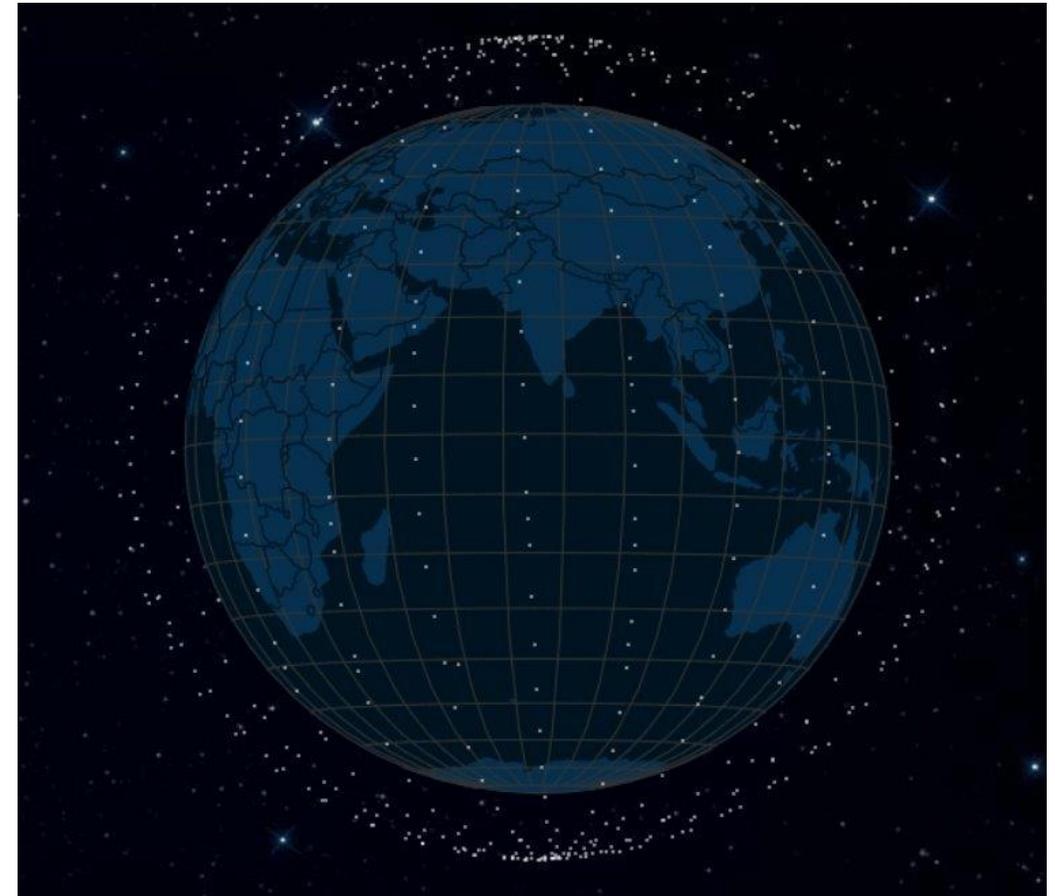
Obiettivo costellazione: fornire un servizio Internet veloce, a bassa latenza ed accessibile ovunque, in termini sia geografici sia economici.

Target finale: collocare in orbita circa 42.000 satelliti.

Gen1 : 4.408 satelliti in cinque gusci orbitali;

Gen2 : 29.998 satelliti;

Aspetti negativi: sia in termini di osservazione astronomica sia in termini di aumento del rischio di collisione.



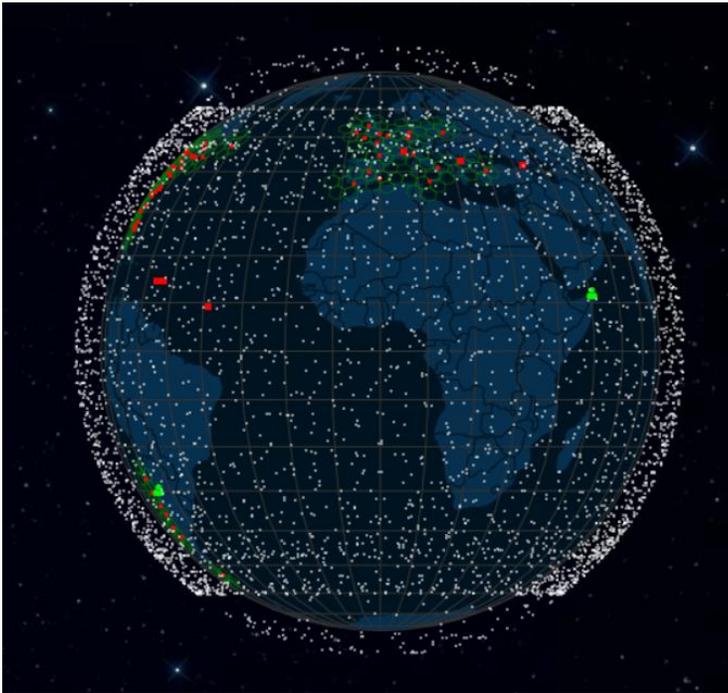
[14] Costellazione OneWeb

- **Configurazione dell'architettura orbitale:**
 - cenni storici sulle costellazioni satellitari
 - motivazioni legate alla scelta dell'orbita bassa
 - aspetti principali del design preliminare della configurazione orbitale;

- **Impatto sull'osservazione astronomica:**
 - soluzioni implementate da SpaceX;
 - risultati delle osservazioni;
 - soluzioni adottate dalla comunità astronomica;

- **Impatto sulla popolazione detritica:**
 - introduzione ai detriti spaziali
 - impatto delle mega-costellazioni
 - strategie di manovre dei satelliti Starlink.

- **Anni '60** : inizio ricerche sulle costellazioni;
- **Anni '70** : prima costellazione di navigazione, "*Transit*" ;
- **Anni '90** : satelliti LEO implementati nel campo della comunicazione - *Iridium, Globalstar e Oneweb*;



[14] A sinistra : Costellazione Starlink, a destra : Costellazione GPS

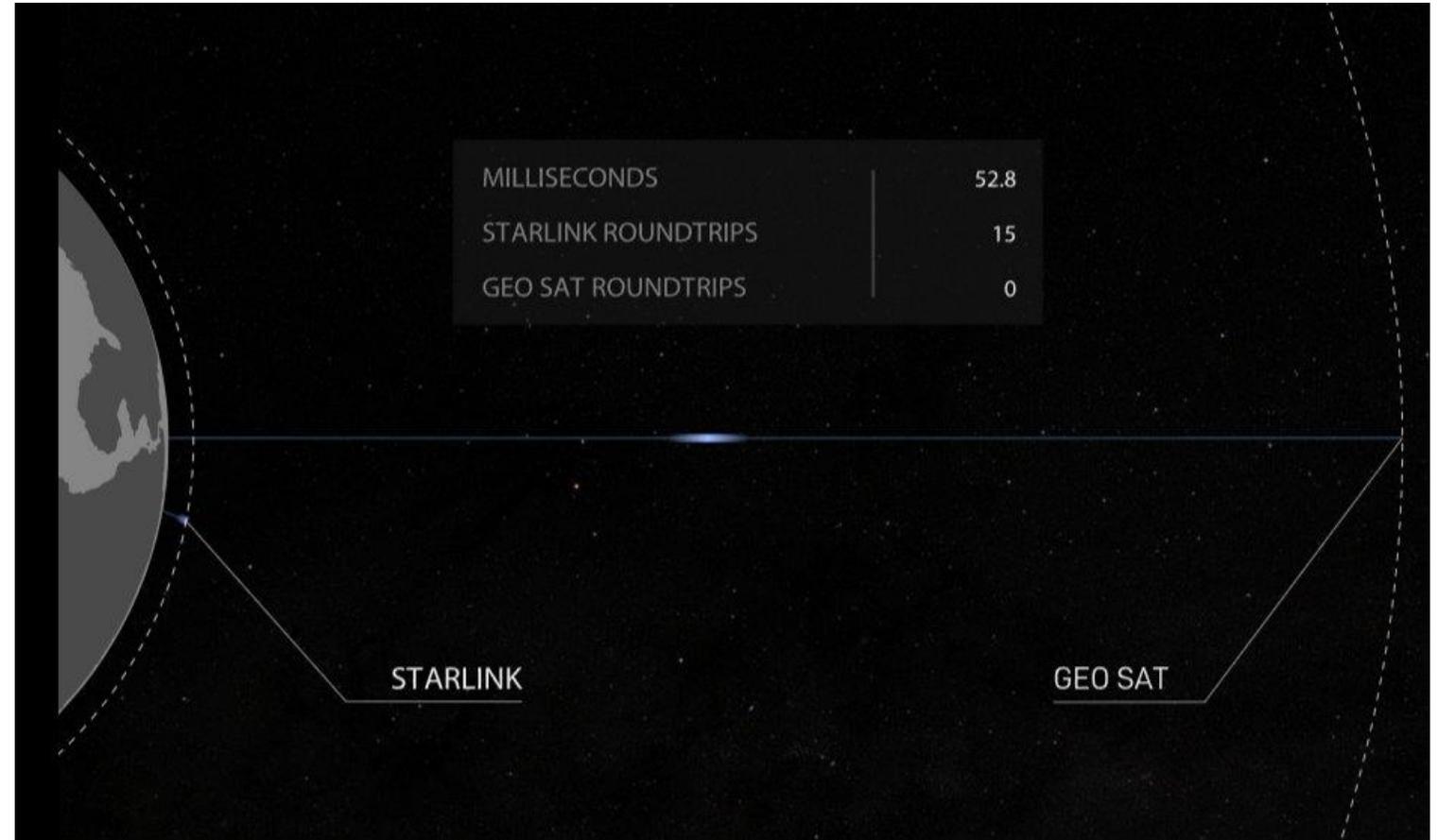
Requisito fondamentale : copertura continua della traccia a terra.

Costellazioni vantaggiose per missioni di comunicazione globale o di voli di navigazione.

- Orbite operative Starlink : **LEO**;
- Requisito di progetto : fornire un **servizio a bassa latenza**;

Differenze legate alla scelta dell'orbita:

- **GEO** :
 - meno satelliti per la copertura;
 - altitudini elevate (35.786 km);
 - latenza elevata (circa 600 ms);
- **LEO** :
 - numero maggiore di satelliti richiesti;
 - altitudini ridotte (< 1000 km);
 - latenza molto ridotta (circa 25 ms);



[13] Simulazione Starlink per mostrare la differenza di latenza del segnale tra GEO e LEO

Configurazione orbitale : divisione in “gusci” (o "shells") connotati da diverse altitudini e inclinazioni.

Ogni guscio orbitale:

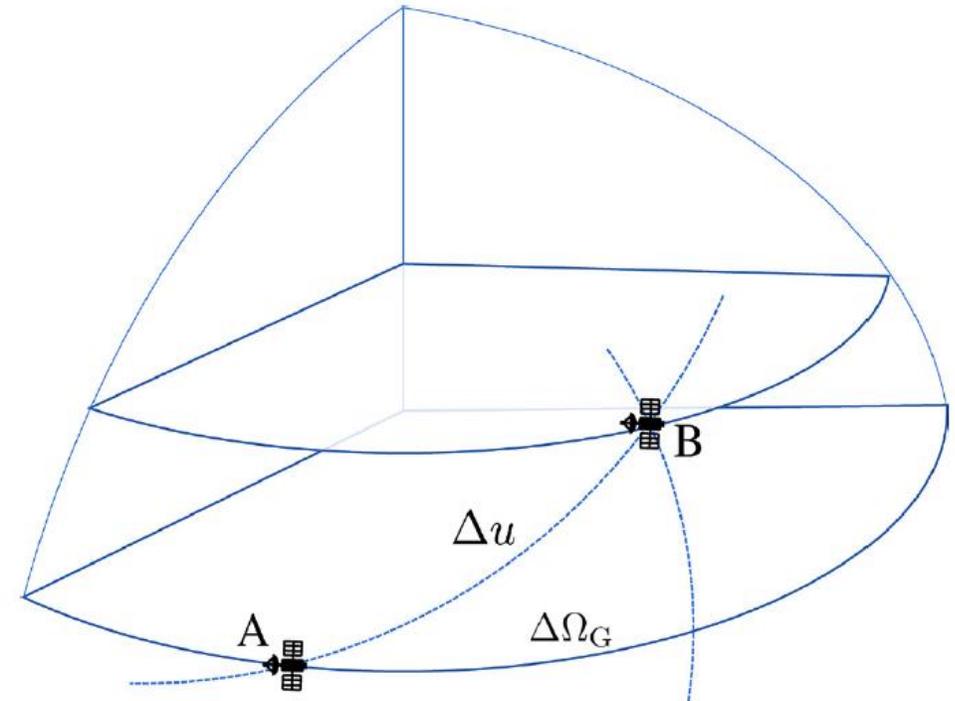
- stesso numero di satelliti degli altri gusci;
- ha specifica altitudine ed inclinazione;

Ogni satellite di un dato guscio :

- occupa da solo il proprio piano orbitale;
- stessa traccia a terra degli altri satelliti del guscio;

Ogni fase prevede un certo numero di gusci;

Due satelliti dello stesso guscio, adiacenti sulla traccia passano in successione per lo stesso subsatellite point.



[2] *Passaggio di due satelliti adiacenti in una porzione di guscio orbitale*

Dopo un certo intervallo di tempo si avrà:

$$\begin{cases} \Delta u = (n + \dot{M} + \dot{\omega}) \cdot \Delta t \\ \Delta \Omega_G = (\omega_e - \dot{\Omega}) \cdot \Delta t \end{cases} \quad (1)$$

Continuità di traccia a terra : **condizione di sincronizzazione ripetuta**

$$\frac{2\pi N_{day}}{\omega_e - \dot{\Omega}} = \frac{2\pi N_{orb}}{n + \dot{M} + \dot{\omega}} \Rightarrow \frac{N_{day}}{N_{orbit}} = \frac{\omega_e - \dot{\Omega}}{n + \dot{M} + \dot{\omega}} \quad (2)$$

(2) permette di :

- ricavare parametri orbitali (a,e,i) e la fase di ogni satellite;
- definire **parametro del periodo ripetuto α** , come:

$$F(a, e, i) \equiv \frac{\omega_e - \dot{\Omega}}{n + \dot{M} + \dot{\omega}} = \frac{N_{day}}{N_{orb}} \equiv \alpha \quad (3)$$

indicatore della "densità" delle tracce dei punti subsatellite, per cui (3) diventa :

$$F(a, e, i) - \alpha = G(a, e, i, \alpha) \quad (4)$$

Sincronizzazione degli altri gusci con quello di riferimento imponendo che:

$$F(a^*, e^* = 0, i^*) = \alpha = F(a_k, e_k = 0, i_k) \quad (5)$$

Legame tra $\Delta\Omega$ e Δu mediante α :

$$\frac{\Delta\Omega_G}{\Delta u} = \frac{\omega_e - \dot{\Omega}}{n + \dot{M} + \dot{\omega}} = \frac{N_{day}}{N_{orbit}} \equiv \alpha \quad \Rightarrow \quad \Delta\Omega = \Delta\Omega_G = \alpha\Delta u \quad (6)$$

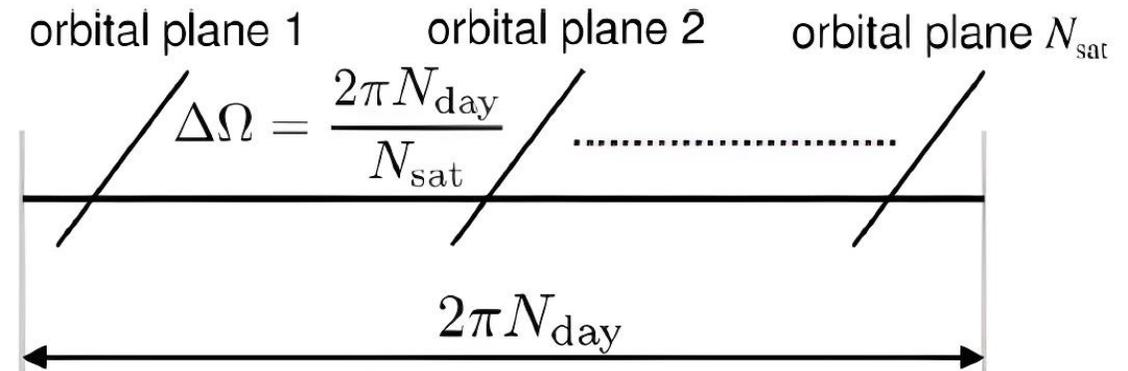
Da (6) si ricavano:

- valori di ascensione retta del nodo ascendente e argomento di latitudine del satellite;
- numero di satelliti, come:

$$N_{sat} = round\left(\frac{2\pi N_{day}}{\Delta\Omega_G}\right) = round\left(\frac{2\pi N_{orb}}{\Delta u}\right) \quad (7)$$

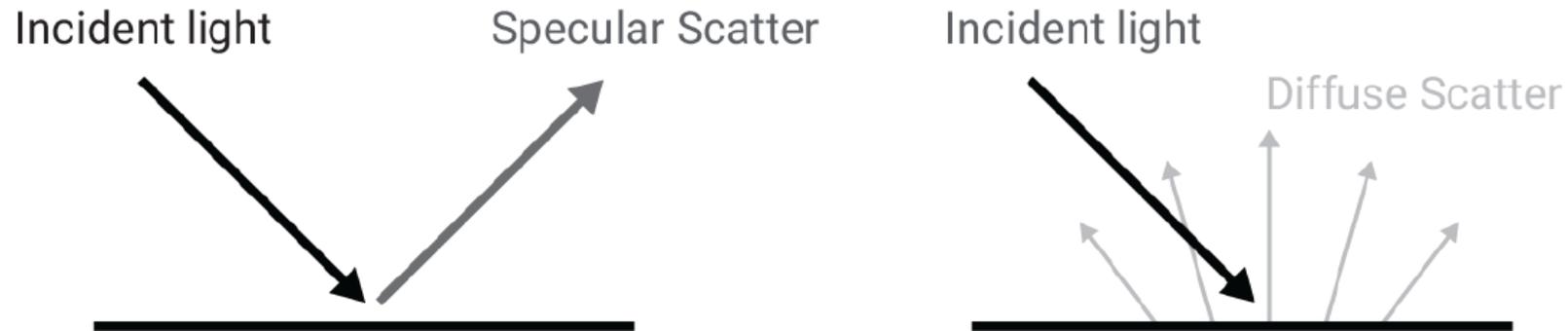
- spaziatura tra piani orbitali adiacenti in termini di RAAN come:

$$\Delta\Omega_{orb} = \frac{2\pi N_{day}}{N_{sat}} \quad (8)$$



[2] Spaziatura tra i piani orbitali della costellazione

Effetti di Starlink: disturbo del cielo notturno - dati inquinati possono diventare inutilizzabili.



[1] A sinistra riflessione speculare a destra riflessione diffusa

Satellite non genera luce propria ma riflette la luce solare.

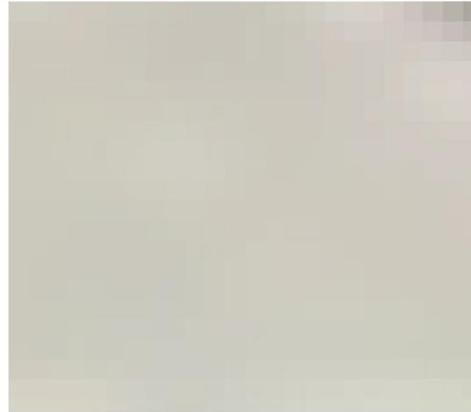
Fattori di influenza della visibilità:

- **Materiali delle superfici del satellite:** riflessione speculare o diffusa. Da considerare anche il grado di assorbimento delle superfici;
- **Orbita operativa:** satellite visibile se collocato sopra il lato oscuro del *terminatore*. In base all'altitudine satelliti possono risultare più visibili in piena notte oppure in fase crepuscolare;

Satelliti di prima generazione:

- **Visiere parasole**, collocate sul telaio;
- **Pellicole a specchio** trasparenti alle radiofrequenze;
- **Oscuramento del materiale inter-cella** dei pannelli solari;

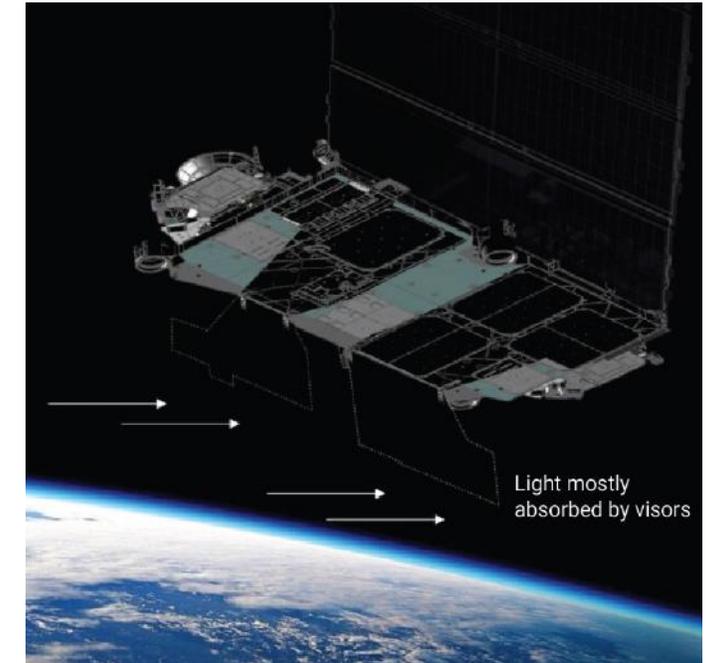
Initial v1 Inter-Cell Material



Darkened v1 Inter-Cell Material

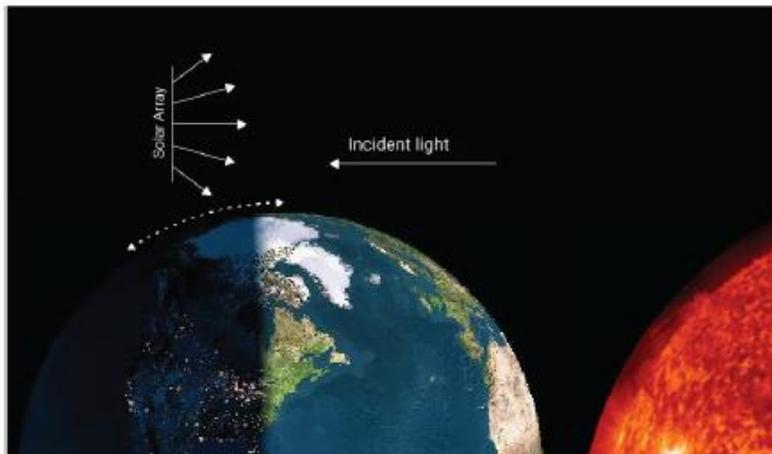


[1] In alto a sinistra confronto materiale inter-cella, a destra visiere parasole, in basso terminator tracking

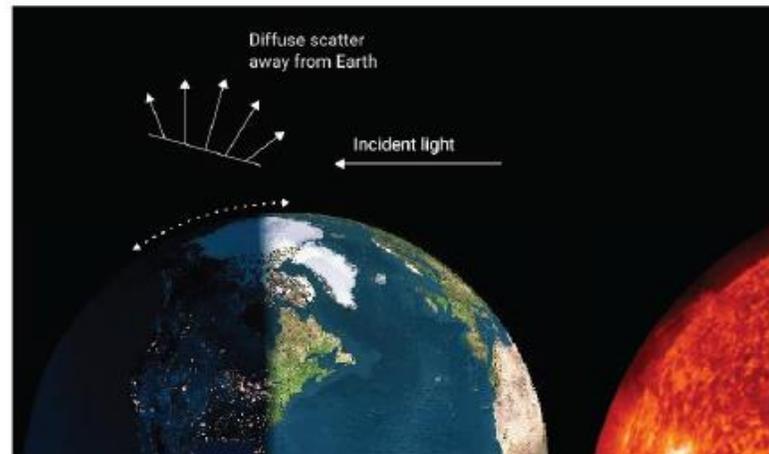


www.dii.unipd.it

Sun Tracking Ideal Power Generation



Brightness Mitigation Reduced Power Generation

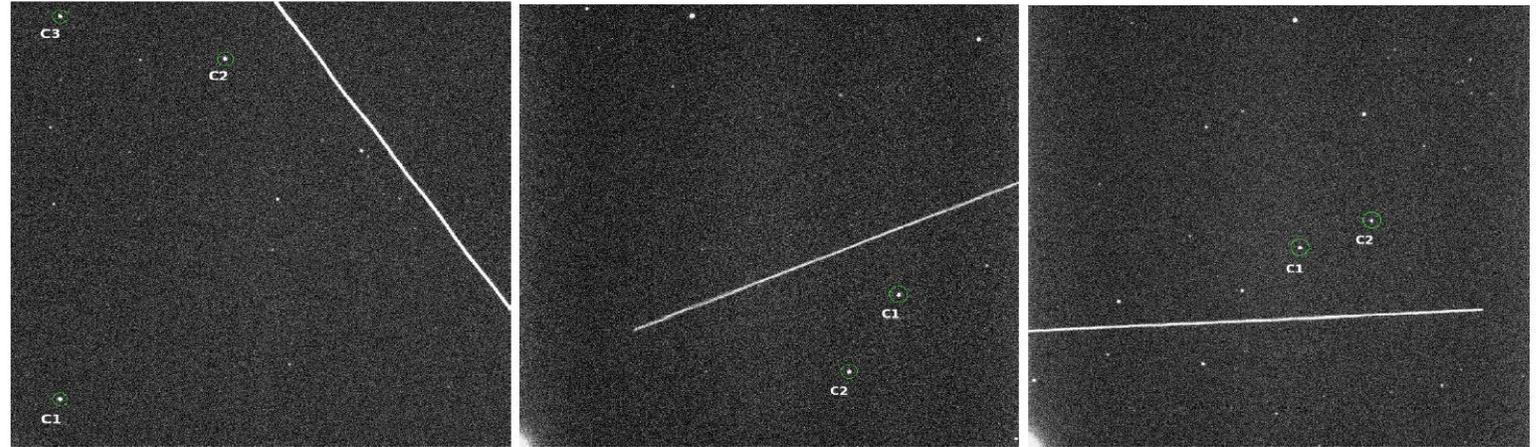


Satelliti di seconda generazione:

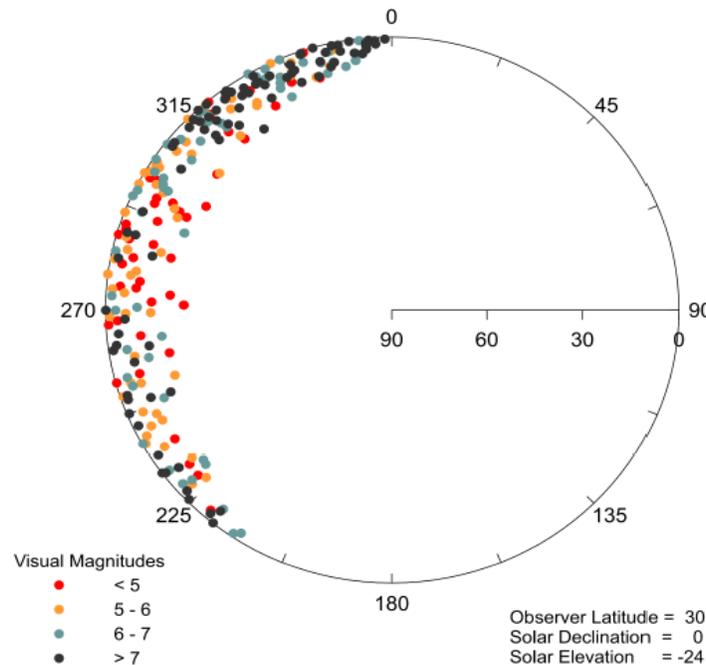
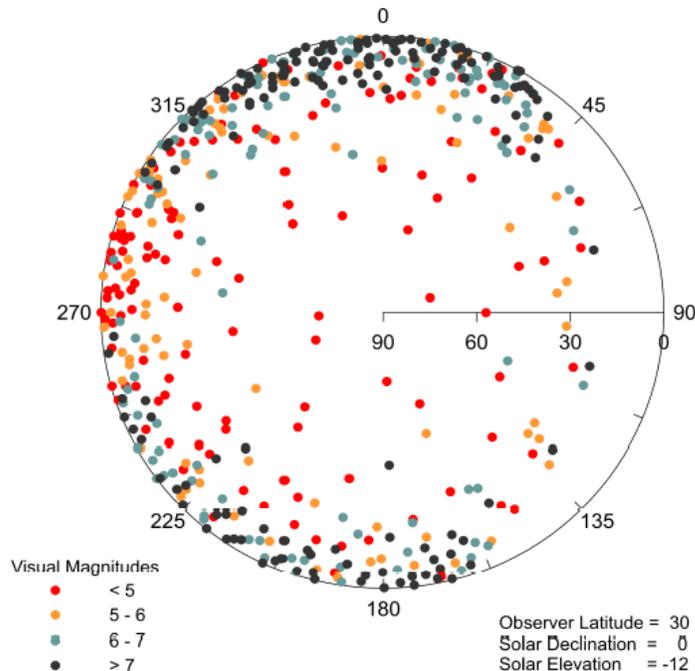
- **Pellicole a specchio dielettriche** di 2^a generazione;
- **Nuova pigmentazione** dei pannelli solari;
- **Terminator tracking**;
- **Vernici nere**;

Specifiche unità satellitari per lo sviluppo di tecniche di mitigazione dell'impatto.

Esempi più rilevanti : VisorSat e DarkSat.



www.dii.unipd.it



[8] In alto scie di DarkSat, [7] in basso mappe satellitari per elevazioni solari di -12° e -24°

Satelliti ad altitudini minori (350 km) hanno un impatto più grave sul **crepuscolo astronomico**;

Per elevazioni $\geq -24^\circ$ magnitudini circa uguali sia a 350 km sia a 550 km.

Principali *tipologie di osservazione*:

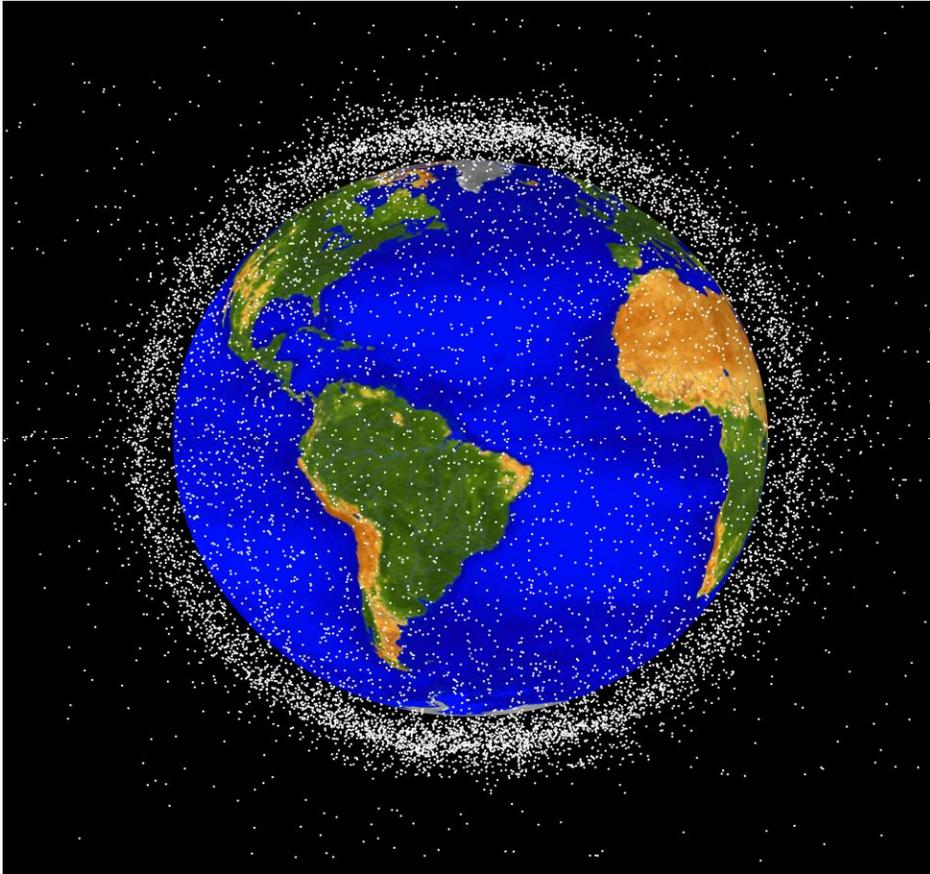
- **Indagini del cielo** : scansionano il cielo con accentuata ripetibilità;
- **Osservazioni opportunistiche**: monitorano corpi celesti di passaggio, tempestive e spesso non ripetibili;

Per salvaguardare le osservazioni si usano *moduli di simulazione* come:

- **Sats Tracker** : modulo di simulazione della visibilità satellitare. Software interattivo, simula la visibilità del satellite nell'arco della notte;
- **Obs Simulator** : modulo di simulazione dell'osservazione. Funzione di simulazione spazio-temporale, può simulare fenomeni celesti in qualsiasi momento e luogo;

Software implementati nel funzionamento del WorldWide Telescope (WWT).

Definizione di *detriti spaziali* (AIDC) : "tutti gli oggetti manmade, inclusi i frammenti di satellite, che si trovano in orbita attorno alla terra o in fase di rientro atmosferico e che sono non funzionanti".



[14] Simulazione NASA della popolazione detritica in LEO

Evitare le collisioni per:

- Salvaguardare missioni ;
- Rallentare creazione di nuovi detriti e verificarsi della *Sindrome di Kessler*.

Presenza di Starlink comporta **aumento del rischio di collisioni** e quindi:

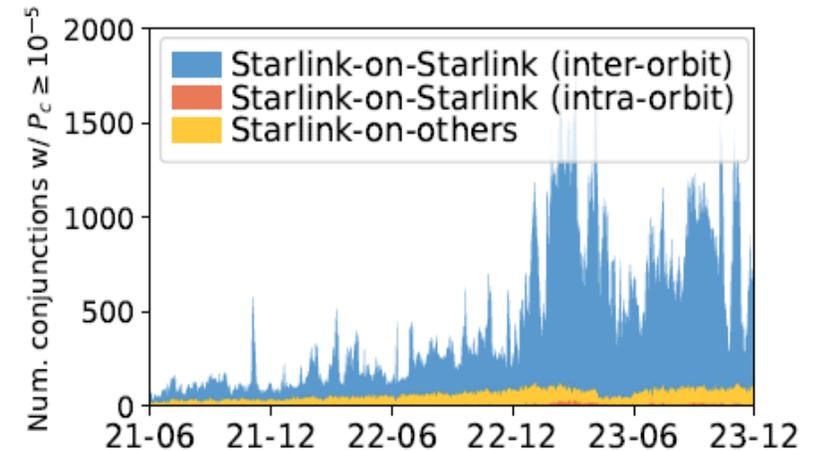
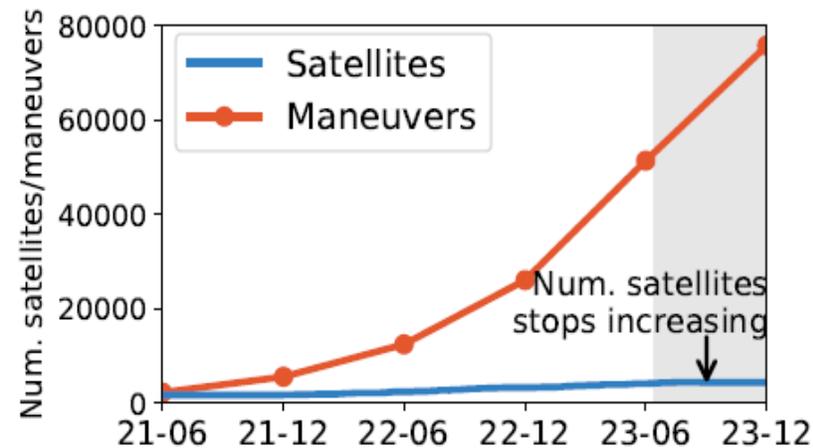
- Peggioramento della qualità del servizio di rete;
- **Creazione di nuovi detriti** - peggioramento delle congestioni orbitali;

Necessità di rilevamento : SpaceX sceglie di non divulgare informazioni dettagliate sulle manovre a causa della natura commerciale e dei potenziali valori militari di Starlink

Due possibilità per il rilevamento:

- Utilizzare dati di **tracciamento in tempo reale**;
- Basarsi sui **dati orbitali storici (TLE)**;

Maggio 2021 : SpaceX comincia a pubblicare le **effemeridi Starlink** su **Space-track**



[6] Crescita delle manovre della costellazione Starlink nel tempo

Vantaggi effemeridi : maggiore accuratezza e aggiornamenti in tempo reale - consentono estrazione più efficace di manovre su piccola scala

Satelliti Starlink prodotti in serie in versioni standardizzate - conseguenze:

- Produzione più rapida;
- Facilità nella disposizione dei satelliti come carico utile;
- Adozione di **strategie specifiche per regolare le orbite** (risparmio sui costi operativi);

Tipologia di manovra	Frequenza di manovra [numero di volte al giorno]	Aumento medio di altitudine [m]	Durata media della manovra [min]
Mantenimento orbita operativa	0,5 - 1	100	4 - 6
Innalzamento	10	500	20
Deorbit	10	600 - 700	23 - 30

Manovre utilizzate per Starlink sono:

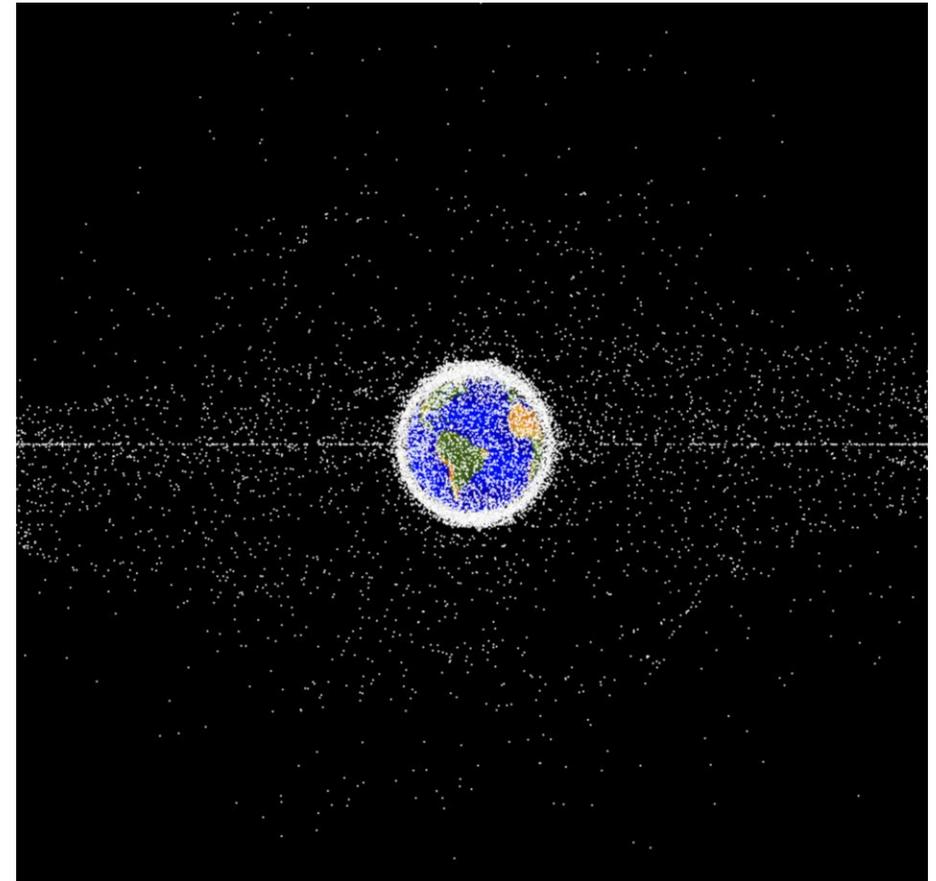
- Manovre di **mantenimento** dell'orbite operative e di parcheggio;
- Manovre continue di **innalzamento** dell'orbita di salita;
- Manovre continue di **abbassamento** dell'orbita per **deorbiting**;

Principale **dilemma** di mega-costellazioni come Starlink: **essere di grande utilità** dal punto di vista tecnologico **ma significativamente rischiose** e dannose dal punto di vista ambientale.

Interessi commerciali e requisiti di funzionamento di architetture orbitali complesse spesso in disaccordo con principi di sostenibilità e di space awareness.

L'attenzione per la **sostenibilità spaziale** è diventata cruciale.

E' necessario continuare ad impegnare quante più risorse possibile nel tentativo di **mitigare in maniera sempre più efficace** i rischi legati alle mega-costellazioni.



[14] *Simulazione NASA dei detriti in orbita intorno alla Terra*

1. *SpaceX* - **COMMITMENT TO SPACE SUSTAINABILITY** ;
2. *TANG Jing-shi, QU Ying-ying, WANG Qi* - **Analysis and Design of Starlink-like Satellite Constellation** ;
3. *Paul J. Groot* - **Satellite shadows through stellar occultations** ;
4. *Z. Cui, Y. Xu* - **Impact simulation of Starlink satellites on astronomical observation using worldwide telescope** ;
5. *Airong Liu, Xiaoli Xu, Yongqing Xiong, Shengxian Yu* - **Maneuver strategies of Starlink satellite based on SpaceX-released ephemeris** ;
6. *Y. Chen, Y. Li, H. Li, L. Liu, L. Ouyang, J. Yang, J. Li, J. Wu, Q. Wu, J. Liu, Z. Lai* - **Instability of Self-Driving Satellite Mega-Constellation From Theory to Practical Impacts on Network Lifetime and Capacity** ;
7. *A. Mallama* - **Predicted Brightness of Starlink Internet Satellites at 350 km**
8. *J. Tregloan-Reed, A. Otarola, E. Ortiz, V. Molina, J. Anais1, R. González, J. P. Colque, and E. Unda-Sanzana* - **First observations and magnitude measurement of Starlink's Darksat**
9. *A. Liu, X. Xu, Y. Xiong, S. Yu* - **Maneuver strategies of Starlink satellite based on SpaceX-released ephemeris**
10. *A. Mallama, R. E.Cole* - **Extreme Flaring of Starlink Satellites**
11. *Y. Lu* - **Impact of Starlink constellation on Early LSST: a Photometric Analysis of Satellite Trails with BRDF Model**
12. <https://space-track.org>
13. <https://www.spacex.com/> e <https://www.esa.int/ESA>
14. <https://satellitemap.space/> e <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/>