Comunicaciones espaciales por RF

Daniel Estévez

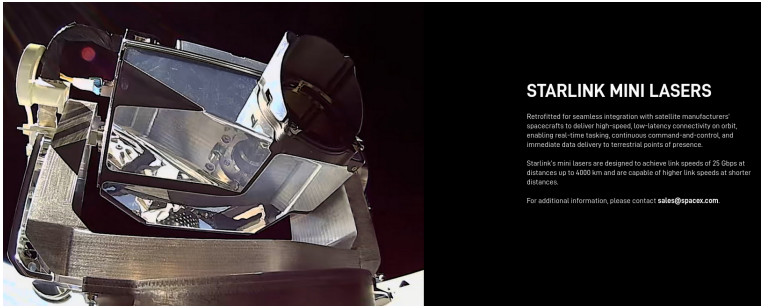
17 noviembre 2025
Asignatura Comunicación con Segmento Terreno
Grado en Física en Instrumentación Espacial
Universidad de Alcalá de Henares

Sobre mí

- Doctor en matemáticas y licenciado en informática
- Especializado en procesamiento digital de señal, SDR, RF y espacio
- Trayectoria profesional:
  - Receptores GNSS en GMV
  - Freelance
    - MuonSpace
    - Otros clientes: modems de tierra y soporte para misiones cubesats, radio espacio profundo...
- Radioaficionado y desarrollador open source: `https://destevez.net`

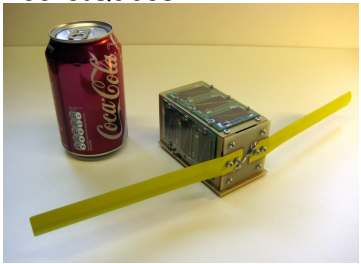
Tipos de comunicaciones espaciales

- Con estación de tierra:
  - TTC (telemetría y telecomando)
  - Alta velocidad (high speed radio, HSR)
- ISL (inter-satellite link)
- Comunicaciones ópticas

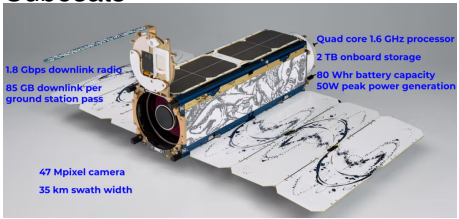


Tipos de satélites

- PocketQubes



- Cubesats



- Microsatélites

vídeo

- Satélites grandes

Las comunicaciones son críticas para la misión

- TTC es necesario para obtener información y controlar el satélite para resolver problemas
- Radio de alta velocidad generalmente es necesaria para descargar datos del payload
- Muchas misiones de PocketQubes y Cubesats fallan completamente porque no es posible establecer comunicaciones con el satélite

Asimetría entre satélite y tierra

Satélite:

- Tamaño de antenas limitado
- Potencia limitada
- Capacidad de cómputo limitado. FPGAs para alta tasa de datos

Tierra:

- Antenas grandes y orientables
- Mayor potencia disponible
- Mayor capacidad de cómputo. Soluciones software pueden ser viables incluso para altas tasas de datos

TTC

- Debe funcionar en cualquier actitud y en el peor caso del link budget
- Sistema muy crítico: debe ser altamente fiable
- Deber ser capaz de transmitir telemetría básica y permitir comandar cualquier función del satélite (también actualizar el software)
- Antenas omnidireccionales o varias antenas de baja ganancia
- Generalmente sistemas basados en paquetes (salvo en satélites grandes)

Radio de alta velocidad

- Alta tasa de datos, según necesidades del payload
- Bajada solamente, o bajada y subida
- Puede requerir actitud del satélite favorable, incluso apuntar antenas a estación de tierra. Puede operar con link budgets típicos (10 dB de FSPL de AOS a TCA)
- Antenas de alta ganancia (gran tamaño), según tamaño del satélite
- Generalmente sistemas de portadora continua
- DVB-S2 muy común
- Planet High Speed Radio: Crossing Gbps from a 3U Cubesat
  `https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4405&context=smallsat`

Bandas de frecuencia

- Bandas más usuales:
  - UHF (400 MHz). Antenas omnidireccionales y de relativamente gran tamaño.
  - S (2 GHz). Banda típica para TTC de microsatélites y satélites grandes. Espectro congestionado.
  - X (8.4 GHz). Mayor ancho de espectro y ganancia de antenas que en banda S.
  - Ka (25-32 GHz). Todavía mayor ancho de espectro y ganancia de antenas. Disponibilidad de estaciones de tierra limitada.
- Full duplex (FDMA) vs half duplex

Operaciones: manual vs automatizado

- Radioaficionados y misiones “universitarias”: operador mirando a una pantalla en tiempo real y tocando botones durante el pase
- Misiones profesionales: sistema automatizado. Operadores reciben alertas y se reacciona a posteriori
- Misiones de espacio profundo: operador especializado monitorizando la sesión de comunicaciones

Métricas e instrumentación

- Métricas típicas receptor: potencia absoluta, SNR, error de frecuencia (Doppler), cuentas de paquetes (detectados, decodificados), tasa de datos...
- Métricas típicas transmisor: cuentas de paquetes y tasa de datos, potencia amplificador...
- Otras métricas: apuntamiento de antenas...
- Visualización de datos: Grafana
- Base de datos de series temporales: InfluxDB
- Instrumentar las radios en el satélite
- Grabación IQ para análisis de contingencias
- Radiometría: análisis de datos derivados de sistemas RF

Contingencias

- Detección de señal por correlación
- TLEs:
  - Apuntamiento de antenas en tierra
  - Corrección de Doppler en tierra (error de frecuencia)
- Error de TLE en la componente along-track: error de tiempo (segundos)
- Estimación de TLEs usando medidas de Doppler: `https://github.com/cbassa/strf`
- Preparar un kit de herramientas para no usarlas nunca

Otros consejos

- Baliza que transmita periódicamente
- Link budgets realistas

SDR

- SDR: implementación de radios en software
- Aceleradores: FPGAs y GPUs
- GNU Radio
- gr-satellites