

Perspectivas tecnológicas de las comunicaciones de espacio profundo

Moisés M. Fernández Álvaro
Academia de las Ciencias y las Artes Militares
Sección de Prospectiva de la Tecnología Militar

26 de febrero de 2021

Redes de espacio profundo.

Las dos redes principales de comunicaciones de espacio profundo, la DSN (*deep space network*) de NASA y la red ESTRACK de la ESA, consiguen su cobertura global con la ubicación de antenas en puntos de la superficie terrestre separados en su longitud 120 grados aproximadamente. La red de NASA dispone de instalaciones en Goldstone (USA), Robledo de Chavela (España) y Canberra (Australia), como se muestra en la imagen. A su vez, la red de la ESA tiene instaladas antenas para espacio profundo en Cebreros (España), New Norcia (Australia) y Malargüe (Argentina).

En ambos casos los tres centros de comunicaciones de cada red están interconectados y proporcionan el solape necesario para asegurar un funcionamiento 24/7 los 365 días del año. Además, se realiza el apoyo mutuo entre ambas redes cuando es requerido para una misión.

En la actualidad la red DSN de NASA, operada por JPL (*Jet Propulsion Lab*), da servicio a más de 35 misiones simultáneamente y la red ESTRACK de la ESA da apoyo a más de una veintena de misiones espaciales.

Características técnicas.

Las grandes distancias que caracterizan este tipo de comunicaciones, a partir de los 2 millones de km de la Tierra, plantean retos tecnológicos tanto al equipo de comunicaciones de la sonda espacial como, especialmente, a la estación terrena. Por ello, asegurar el balance del enlace y por tanto la fiabilidad de la comunicación con margen suficiente, implica establecer unos requisitos técnicos muy exigentes a los parámetros que definen dicho enlace.

Para ilustrar el efecto de la distancia, sirva como ejemplo la comunicación con la sonda OSIRIS-REx que recientemente ha recogido muestras de la superficie del asteroide Bennu situado en estos momentos a 330 millones de km de distancia, lo que supone un retraso entre las comunicaciones de ida y vuelta de 18,5 minutos.

O, por ejemplo, en el caso de las comunicaciones con las sondas Voyager navegando ya fuera del sistema solar, las señales tardan cerca de 40 horas en llegar y la potencia recibida por las antenas de 70m de diámetro es tan pequeña que se necesitarían diez mil millones de años acumulando la potencia recibida para poder encender la bombilla de un frigorífico...

Para establecer esa intercomunicación permanente se precisa:

- Capturar toda la información procedente de la sonda, ello requiere receptores muy sensibles.
- Enviar los comandos con la potencia suficiente para que puedan ser recibidos por las antenas, de dimensiones reducidas, de la sonda, lo cual requiere transmisores muy potentes en la estación terrestre.
- Proporcionar con precisión los datos de navegación, lo que requiere relojes muy estables y algoritmos precisos, fiables y rápidos para el cálculo de trayectorias y determinación de la posición del satélite en el espacio.

Los principales parámetros son: la velocidad de datos, la potencia de transmisión, la banda de frecuencia, el tamaño (diámetro) y ganancia de la antena, el factor de pérdidas por desfase en el apuntamiento, el ruido del receptor, etc.

A lo largo de los años el tamaño de las antenas ha ido aumentando desde los 26m utilizados en los años 50 hasta llegar a los 70m de diámetro que la red DSN tiene en sus tres emplazamientos, con diseños de antena parabólica tipo Cassegrain; estas antenas son las únicas capaces de contactar en la actualidad con las sondas Voyager I y II. En la imagen se muestra cómo el subreflector secundario permite el ajuste fino del foco en el *feeder*, el cono de cada una de las frecuencias utilizadas.

ANTENAS Cassegrain



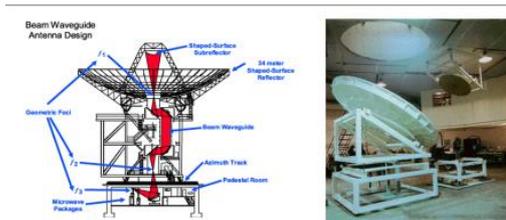
Este diseño utiliza un concepto equivalente a los telescopios Cassegrain; el reflector secundario realiza la alineación del foco en el feeder de cada banda de frecuencia

70m picture (tri-cone)

Diseño antenas Cassegrain (Fuente: NASA/JPL)

No obstante, la complejidad de su funcionamiento y su elevado coste de mantenimiento correctivo y preventivo han motivado el desarrollo de nuevos diseños más fiables y mucho menos costosos. Actualmente se ha estandarizado el uso de antenas de nueva generación, tipo BWG (*beam wave guide*), de 34m de diámetro (o 35m en la red ESTRACK), con espejos dicróicos metálicos que trabajan en el rango de las Mw y permiten instalar todo el equipamiento de las cadenas de transmisión y recepción en una zona accesible en el pedestal de la antena.

ANTENAS BWG



Diseño antenas BWG (Fuente: NASA/JPL)

Para la transmisión de telecomandos se han estandarizado transmisores de 20kW y 80 kW, alcanzándose hasta los 400kW.; la cadena de recepción utiliza LNA a -258°C para disminuir el ruido electrónico. Estas antenas tienen un peso aproximado de 600 Tn en la parte móvil y 40m de altura.

Asimismo, el aumento en la velocidad de datos de transmisión ha sido espectacular, hasta 10^{13} veces, y está previsto llegar hasta Gbps en las futuras misiones robóticas a Marte. De manera similar, en la precisión angular para el seguimiento y determinación orbital se han alcanzado precisiones de nrad.

Configuración de la red.

El elemento visualmente más espectacular de una red de espacio profundo es sin duda el conjunto de antenas de gran tamaño, ya que son el eslabón de comunicación directa con la nave espacial.

Actualmente, en la Estación de Robledo de Chavela, denominada MDSCC (*Madrid Deep Space Communications Center*), están operativas cuatro antenas: DSS63 (70m de diámetro, en bandas X y S), DSS65 (34m, en bandas X y S), DSS54 (34m, en bandas Ka, X y S) y DSS55 (34m, en bandas Ka y X). Además, en breve entrará en servicio la nueva antena DSS56 y a lo largo del 2021 la DSS53 (ambas de 34m, en bandas X y S, y en un futuro la Ka) lo cual aumentará de manera significativa su capacidad y fiabilidad.

Por su parte, la red ESTRACK de la ESA, cuenta con una antena de 35m de diámetro en cada emplazamiento: DSA1 en New Norcia, DSA2 en Cebreros y la DSA3 en Malargüe, todas ellas en bandas X y Ka.

Pero el sistema necesita además otros elementos:

- El Centro de Procesado de la Señal (SPC), donde se procesa la telemetría recibida y se separan los datos científicos de la misión de los datos de ingeniería, cuyo análisis permite conocer el estado de los sistemas de abordo y de los sensores, y la posición de la sonda.
- El Centro de Operaciones de Espacio Profundo (DSOC de la NASA ubicado en Pasadena y ESOC de la ESA situado en Darmstadt, Alemania), donde se elaboran los comandos del telemando para transmitir órdenes o secuencias de órdenes de ejecución directa o de ejecución retardada, o modificar incluso el software de la computadora de a bordo. De esta manera se pueden activar instrumentos, cambiar determinados parámetros operativos, ordenar maniobras para corregir la trayectoria de las naves, etc.
- El Centro de Operaciones de la Misión (MOC de la NASA y ESAC de la ESA situado en Villafranca), donde se postprocesan los datos científicos recibidos y se determinan los comandos a ejecutar por los sensores de la sonda, que se incluirán en la señal de telemando.

Todos estos centros han de estar interconectados en tiempo real para asegurar una toma de decisiones operacional en caso de emergencia.

- El sistema de instalaciones de: suministro de permanente de energía (conectada a la red comercial de alta tensión y, en caso de fallo, una capacidad de alimentación autónoma con generadores diésel), HVAC (*heating, ventilating, air conditioned*), protección contra-incendios, seguridad física y ciberseguridad, etc.
- Un estricto sistema de documentación y gestión del mantenimiento preventivo y correctivo, y de la gestión logística de repuestos, que aseguren una fiabilidad del servicio superior al 99%.

CONFIGURACIÓN DE LA RED



Red DSN (Fuente: NASA/JPL)



Centro de Control de New Norcia (ESA)

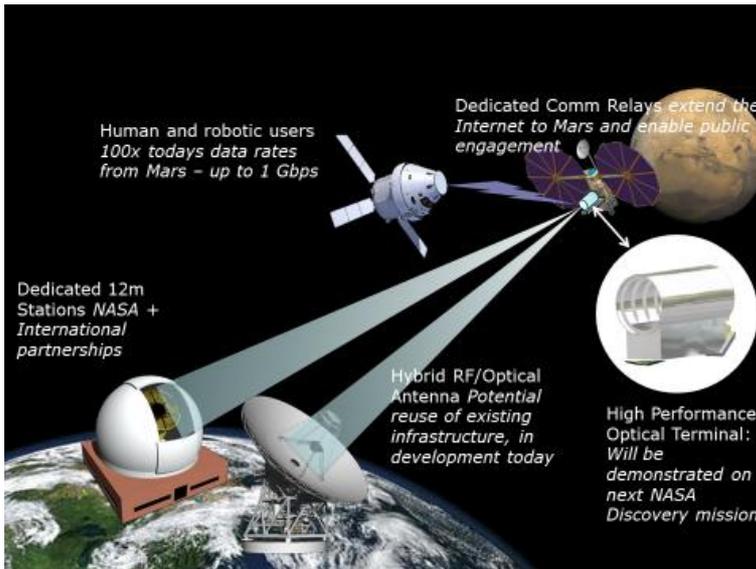
Retos futuros.

Desde el principio de la exploración espacial las misiones han aumentado su complejidad y con ello la necesidad de transmitir y recibir más datos se ha incrementado de manera continua y explosiva. Las futuras misiones robóticas con muchos más sensores, cámaras e instrumentos a bordo van a requerir un gran incremento de telecomandos y generarán del orden de más de 100 veces de datos que sus predecesores. De manera similar, las misiones tripuladas necesitarán para la monitorización continua de las constantes vitales de los astronautas una red de soporte vital específica y segura.

Este incremento continuo ha motivado un inexorable aumento del ancho de banda para la transmisión de datos y por tanto ir a frecuencias cada vez más altas. De las frecuencias en VHF y UHF en las primeras misiones se pasó a la banda S (2 GHz) que aún se utiliza, por ejemplo, con las naves *Voyager 1* y *2*. La mayor parte de las misiones actuales trabajan en la banda X (8 GHz) para telecomando y para la telemetría paulatinamente se han ido utilizando también las bandas K y Ka (26 GHz y 32 GHz).

Comunicaciones ópticas: Pero el futuro está en las comunicaciones ópticas, pasar a frecuencias de THz permitirá aumentar tres órdenes de magnitud el ancho de banda utilizable y aumentar 100 veces la velocidad de transmisión de datos, lo que facilitará la emisión de video con calidad 4K desde la luna. Para el año 2022 está prevista la misión *Psyche* de demostración de tecnología utilizando un haz láser para la transmisión de datos y telecomandos y el telescopio óptico de Monte Palomar de 200 pulgadas de diámetro.

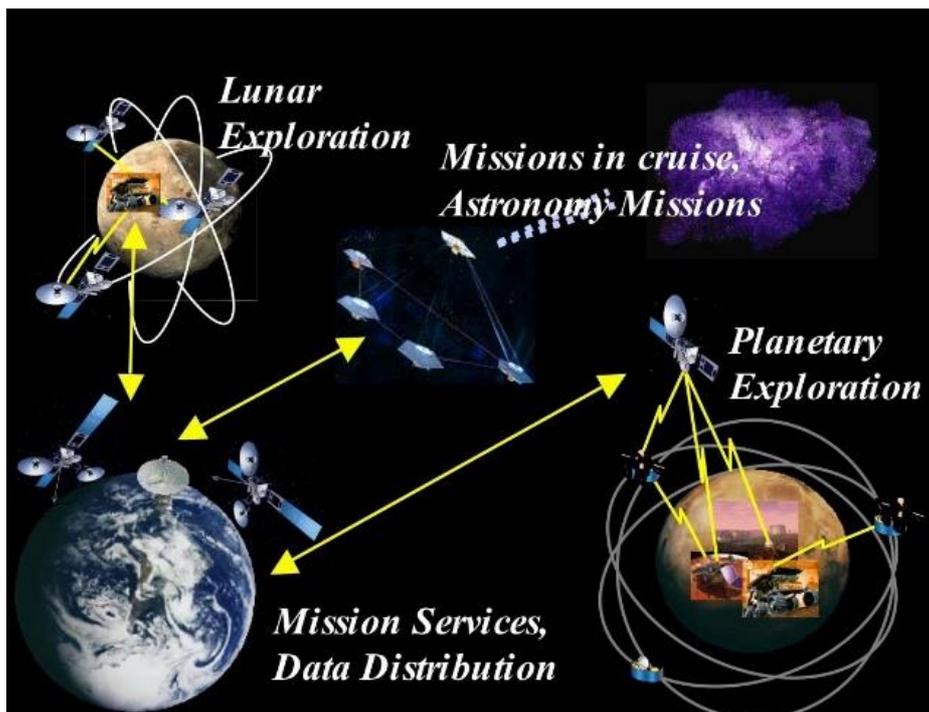
El éxito de esta demostración permitirá avanzar el concepto de reutilización de la infraestructura existente actualmente mediante el desarrollo de antenas híbridas RF/Ópticas. Las actuales antenas de 34 m se recubrirían con paneles reflectantes en la longitud de onda del láser de comunicaciones y transparentes en RF, con lo que se conseguirían telescopios ópticos equivalentes de 8m de apertura, según los primeros estudios realizados. Además, NASA prevé estaciones ópticas dedicadas de 12m de apertura para colaboraciones con otras agencias internacionales.



Comunicaciones futuras (Fuente: NASA/JPL)

MSPA: Otro concepto que está en desarrollo es el MSPA (multiple spacecraft per antenna) en las próximas misiones operacionales en Marte, que permitirá recibir simultáneamente los datos del robot sobre la superficie marciana y los datos de los cubesats que permanecen en órbita marciana monitoreando su atmósfera y otras características ambientales del planeta; posteriormente, se realiza en tierra la separación y postproceso de toda la información recibida.

Internet interplanetario: Para aumentar el tráfico de información con Marte, se prevé una constelación de cubesats orbitando el planeta y satélites relé situados en el espacio de manera que se pueda mantener un flujo de comunicación continuo, robusto y sin interrupciones con la Tierra, como una red de internet. Este concepto



iría ampliándose según fuera extendiéndose la exploración interplanetaria más allá del cinturón de asteroides, con misiones de astronomía y, especialmente, con las futuras misiones tripuladas de exploración de la Luna.

Internet interplanetario (Fuente: NASA/JPL)

Conclusiones.

Las comunicaciones de espacio profundo han estado desde el principio en la vanguardia de la tecnología. Han exigido a lo largo de sus más de 50 años de existencia un proceso continuo de investigación y desarrollo de nuevas tecnologías, de nuevas capacidades y de nuevos equipos que posteriormente se han ido incorporando en los desarrollos de las comunicaciones con satélites en órbita baja y geoestacionaria.

Los nuevos requisitos técnicos y operativos que debe satisfacer la red de espacio profundo en las misiones de esta década serán la base de los desarrollos de las comunicaciones espaciales comerciales y militares del futuro.