

Recomendación UIT-R SA.1014-4 (12/2023)

Serie SA: Aplicaciones espaciales y meteorología

**Requisitos de radiocomunicaciones para
la investigación del espacio lejano con
vuelos tripulados y no tripulados**

Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de las Recomendaciones UIT-R	
(También disponible en línea en https://www.itu.int/publ/R-REC/es)	
Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión (sonora)
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radioastronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
SNG	Periodismo electrónico por satélite
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
V	Vocabulario y cuestiones afines

Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2024

RECOMENDACIÓN UIT-R SA.1014-4

Requisitos de radiocomunicaciones para la investigación del espacio lejano con vuelos tripulados y no tripulados

(1994-2006-2011-2017-2023)

Cometido

En esta Recomendación se describen brevemente algunas características esenciales de las radiocomunicaciones del servicio de investigación espacial (espacio lejano). Estas características influyen o determinan los requisitos para la selección de las bandas candidatas, la coordinación, la compartición de la banda y la protección contra la interferencia.

Palabras clave

Espacio lejano; radiocomunicaciones; telemetría; telemando; velocidad de datos; estaciones terrenas; estaciones espaciales; determinación de la distancia; radiociencia

Recomendaciones e Informes relacionados

Recomendación UIT-R SA.1015, Informe UIT-R SA.2167, Informe UIT-R SA.2177.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que las radiocomunicaciones entre la Tierra y las estaciones del espacio lejano tienen exigencias muy peculiares;
- b) que estas exigencias afectan a la selección de bandas candidatas, la compartición de bandas, la coordinación, la protección contra interferencias y otros asuntos reglamentarios y de gestión de frecuencias,

recomienda

que se tengan en cuenta los requisitos y características descritos en el Anexo para las radiocomunicaciones relativas al servicio de investigación espacial (espacio lejano) y su interacción con otros servicios.

Anexo

Requisitos de radiocomunicaciones para la investigación del espacio lejano con vuelos tripulados y no tripulados

ÍNDICE

		Página
1	Introducción.....	2
2	Requisitos de radiocomunicaciones.....	3
2.1	Requisitos de telemetría	3
2.2	Requisitos de telemando	4
2.3	Requisitos de seguimiento	5
2.4	Necesidades especiales en caso de misiones tripuladas en el espacio lejano	6
3	Características técnicas.....	6
3.1	Ubicaciones y características de las estaciones terrenas del servicio de investigación espacial (espacio lejano).....	6
3.2	Estaciones espaciales	8
4	Métodos de radiocomunicación con el espacio lejano	9
4.1	Seguimiento de portadora y medición Doppler	9
4.2	Modulación y demodulación	10
4.3	Codificación.....	10
4.4	Multiplexión	10
4.5	Determinación de la distancia.....	10
4.6	Ganancia y puntería de la antena	11
4.7	Técnicas de radionavegación adicionales	12
5	Análisis de la calidad de funcionamiento y márgenes de diseño	13

1 Introducción

El presente Anexo expone algunas características de las misiones de investigación del espacio lejano, los requisitos funcionales y de calidad de las radiocomunicaciones que se requieren para la investigación del espacio lejano con vehículos espaciales y los parámetros y métodos técnicos de los sistemas utilizados en relación con estas misiones.

En el Informe UIT-R SA.2177 figuran consideraciones relativas a los requisitos y características de la anchura de banda.

2 Requisitos de radiocomunicaciones

Las misiones en el espacio lejano exigen comunicaciones fiables durante periodos de tiempo prolongados y para grandes distancias. Por ejemplo, una misión espacial cuyo objetivo sea reunir información científica sobre Neptuno dura ocho años y requiere radiocomunicaciones a una distancia de $4,65 \times 10^9$ km. Como consecuencia de las grandes distancias de radiocomunicación inherentes a la investigación del espacio lejano, es preciso disponer de una p.i.r.e. elevada y de receptores muy sensibles en las estaciones terrenas.

La utilización continua de bandas de frecuencia de radiocomunicaciones del servicio de investigación espacial (espacio lejano) es consecuencia de las abundantes misiones en curso y proyectadas. Como la mayoría de ellas duran varios años y suele haber varias misiones en curso simultáneamente, surge la correspondiente necesidad de radiocomunicarse con varios vehículos espaciales al mismo tiempo.

Por otra parte, cada misión puede incluir más de un vehículo espacial, lo que exige la radiocomunicación simultánea con varias estaciones espaciales. También puede resultar necesario disponer de radiocomunicaciones coordinadas simultáneas entre una estación espacial y más de una estación terrena.

2.1 Requisitos de telemetria

La telemetria se utiliza para transmitir datos científicos y de mantenimiento desde un vehículo espacial en el espacio lejano.

Para garantizar la seguridad del vehículo espacial y el éxito de la misión, debe recibirse información telemetria sobre la condición del citado vehículo espacial. Ello exige contar con un enlace de radiocomunicaciones que sea independiente de las condiciones meteorológicas y que tenga suficiente capacidad. Este requisito es uno de los factores determinantes a la hora de elegir las bandas de frecuencias preferidas para la investigación del espacio lejano (véase el Informe UIT-R SA.2177).

La telemetria científica supone la transmisión de datos obtenidos mediante instrumentos científicos de a bordo. La velocidad de datos requerida y la proporción de errores aceptable pueden ser muy distintas en función de la medida y del instrumento en cuestión. En el Cuadro 1 figuran las velocidades de transmisión de datos máximas requeridas para la telemetria científica y de mantenimiento.

CUADRO 1

Velocidades binarias máximas para la investigación del espacio lejano

Sentido y función	Característica del enlace			
	Unidad	Independiente de las condiciones meteorológicas	Normal	Velocidad binaria elevada
Tierra-espacio				
Telemando	bit/s	1 000	1 000	2 000
Programación de computador	kbit/s	50	100	200
Audio	kbit/s	45	45	45
Vídeo	Mbit/s	4	12	30

CUADRO 1 (*fin*)

Sentido y función	Característica del enlace			
	Unidad	Independiente de las condiciones meteorológicas	Normal	Velocidad binaria elevada
Espacio-Tierra				
Telemedida para mantenimiento	bit/s	500	500	2×10^5
Datos científicos	kbit/s	115	500	3×10^5
Audio	kbit/s	45	45	45
Vídeo	Mbit/s	0.8	8	30

La capacidad del enlace de telemedida ha aumentado continuamente con el desarrollo de nuevos equipos y técnicas. Este incremento de la capacidad puede aprovecharse de dos maneras:

- para recoger mayor cantidad de datos científicos sobre un planeta determinado o a una distancia dada; y
- para poder enviar misiones útiles a planetas más distantes.

En un sistema de telemedida dado, la máxima velocidad de transmisión de datos posible es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de radiocomunicación. La misma capacidad de enlace que permite obtener una velocidad de 134 kbit/s desde las cercanías de Júpiter ($9,3 \times 10^8$ km) permitiría una velocidad de 1,74 Mbit/s desde las cercanías de Venus ($2,58 \times 10^8$ km). Como las velocidades de transmisión de datos más elevadas exigen anchuras de banda de transmisión más amplias, la posibilidad de utilizar de manera efectiva la máxima capacidad de telemedida depende de la anchura de las bandas atribuidas y del número de vehículos espaciales en misión que se encuentran simultáneamente dentro del haz de la estación terrena y se explotan en la misma banda.

El desarrollo de métodos de codificación que permiten la explotación con una menor relación señal/ruido ha constituido una importante contribución a la telemedida. La señal codificada exige una anchura de banda de transmisión más amplia. La utilización de telemedida codificada a velocidades de transmisión de datos muy elevadas puede estar limitada por la anchura de las atribuciones.

2.2 Requisitos de telemando

La fiabilidad es el requisito principal de un enlace de telemando. Las instrucciones deben recibirse con exactitud y cuando se precisen. Típicamente, la proporción de bits erróneos admitida en el enlace de telemando no puede rebasar 1×10^{-6} . Las instrucciones deben recibirse satisfactoriamente, con independencia de la orientación del vehículo espacial, incluso cuando la antena principal de alta ganancia no apunte hacia la Tierra. Por consiguiente para la recepción es necesario utilizar en el vehículo espacial una antena casi omnidireccional. La p.i.r.e. de las estaciones terrenas tiene que ser muy alta debido a la baja ganancia de la antena del vehículo espacial y con el fin de ofrecer una elevada fiabilidad.

Cuando los vehículos espaciales llevan computadores, la ordenación secuencial y el funcionamiento automático de los sistemas de dichos vehículos están en gran parte predeterminados y almacenados a bordo para su posterior ejecución. Para algunas secuencias complicadas, el funcionamiento automático es imprescindible. Es preciso recurrir al telemando para modificar, durante la misión, las instrucciones almacenadas, lo que puede ser necesario para corregir variaciones o defectos observados en el comportamiento del vehículo espacial. Esto es especialmente importante en misiones de larga duración y en los casos en que la ordenación secuencial depende de eventos

anteriores del vehículo espacial. Por ejemplo, las instrucciones para corregir la trayectoria del vehículo espacial se basan en mediciones de seguimiento y no pueden determinarse.

En el Cuadro 1 se indica la gama de velocidades de transmisión de datos necesarias para el telemando.

Un sistema fiable de telemando requiere un sistema de telemida de mantenimiento fiable que permita verificar si las instrucciones se reciben y se cargan en la memoria correctamente.

2.3 Requisitos de seguimiento

El seguimiento proporciona información utilizada para la navegación del vehículo espacial y para estudios de radiociencia.

2.3.1 Navegación

Las mediciones de seguimiento para la navegación son las del desplazamiento Doppler a frecuencias radioeléctricas, la del tiempo de propagación de ida y vuelta de una señal de determinación de distancias y la recepción de señales adecuadas para la interferometría con línea de base larga. Las mediciones deben efectuarse con un grado de precisión que satisfaga los requisitos de navegación. En la precisión de la medida influyen las variaciones de la velocidad de propagación, el conocimiento de la ubicación de la estación, la precisión de las señales de tiempo y el retardo del circuito electrónico en los equipos de la estación terrena y de la estación espacial. El Cuadro 2 muestra un ejemplo de las necesidades en cuanto a la precisión de la navegación y de las mediciones asociadas.

CUADRO 2

Requisitos de navegación y seguimiento

Parámetro	Valor
Precisión de navegación (m)	300 (en Jupiter)
Precisión de medición Doppler (Hz)	$\pm 0,0005$
Precisión de determinación de la distancia (m)	$\pm 0,15$
Precisión de ubicación de la estación terrena (m)	± 1
Velocidad de segmentos* de determinación de la distancia (Tierra-espacio y espacio-Tierra)	
Independiente de la meteorología (MChip/s)	1
Normal (MChip/s)	10
Alta velocidad (MChip/s)	24

* Frecuencia de impulsos de transmisión o recepción de una secuencia de códigos de ruido pseudoaleatorio (PN) utilizado para determinar la distancia

2.3.2 Radiociencia

Los enlaces de radiocomunicación con el vehículo espacial pueden también ser de importancia para los estudios sobre propagación, relatividad, mecánica celeste y gravitación. La información necesaria se obtiene midiendo la amplitud, la fase, la frecuencia, la polarización y el retardo. La posibilidad de efectuar estas mediciones depende de la disponibilidad de atribuciones de frecuencias apropiadas. Por encima de 1 GHz, el retardo de transmisión y la rotación de Faraday (efectos de las partículas cargadas y del campo magnético) disminuyen rápidamente al aumentar la frecuencia; por consiguiente, las frecuencias más adecuadas para estudiarlos son las más bajas de la gama. Las frecuencias más altas son relativamente insensibles a estos efectos y se prestan más para estudios sobre relatividad,

gravitación y mecánica celeste. Para estos estudios es preciso calibrar los efectos de las partículas cargadas a las frecuencias más bajas de la gama.

Para estos trabajos científicos fundamentales es preciso medir la distancia con una precisión absoluta de 1 a 2 cm. Tal precisión exige el empleo de señales codificadas de banda ancha así como la utilización simultánea de distintas frecuencias para evaluar los efectos de las partículas cargadas.

2.4 Necesidades especiales en caso de misiones tripuladas en el espacio lejano

Las necesidades funcionales de estas misiones serán de tipo similar a las de las misiones no tripuladas. No obstante, la presencia de seres humanos en el vehículo espacial impondrá requisitos adicionales en cuanto a la fiabilidad de las funciones de telemedida, telemando y seguimiento. Teniendo en cuenta el nivel de fiabilidad necesario, la diferencia esencial entre las misiones tripuladas y no tripuladas será la utilización de enlaces de voz y audio para las radiocomunicaciones Tierra-espacio y espacio-Tierra. En el Cuadro 1 figuran las velocidades de transmisión de datos para estas funciones.

Desde el punto de vista de las radiocomunicaciones, el efecto de estas funciones adicionales será la necesidad de ampliar la anchura de banda de transmisión para dar cabida a las señales de vídeo. Dadas la calidad y la fiabilidad del enlace necesarias para las velocidades de transferencia de datos requeridas, las radiocomunicaciones para las misiones de investigación del espacio lejano con vuelos tripulados y no tripulados son similares.

3 Características técnicas

3.1 Ubicaciones y características de las estaciones terrenas del servicio de investigación espacial (espacio lejano)

En el Cuadro 3 se indican las ubicaciones de las estaciones terrenas con capacidad de funcionamiento en bandas atribuidas a la investigación del espacio lejano.

CUADRO 3

Ubicación de estaciones terrenas del servicio de investigación espacial (espacio lejano)

Administración	Ubicación	Latitud	Longitud
China	Kashi	38° 55' N	75° 52' E
	Jiamusi	46° 28' N	130° 26' E
	Kunming	25° 32' N	102° 48' E
	Miyun	40° 33' N	116° 58' E
	Shanghai	31° 06' N	121° 12' E
	Ürümqi	43° 28' N	87° 11' E
	Neuquén (Argentina)	39° 11' S	69° 52' W
Agencia Espacial Europea	Cebreros (España)	40° 27' N	4° 22' W
	Malargüe (Argentina)	35° 46' N	69° 22' W
	New Norcia (Australia)	31° 20' N	116° 11' E
Alemania	Weilheim	47° 53' N	11° 04' E
Ucrania	Evpatoriya	45° 11' N	33° 11' E
Rusia	Medvezhi ozera	55° 52' N	37° 57' E
	Ussuriisk	44° 01' N	131° 45' E
	Kalyazin	57° 13' N	37° 54' E

CUADRO 3 (*fin*)

Administración	Ubicación	Latitud	Longitud
Japón	Usuda, Nagano	36° 08' N	138° 22' E
	Uchinoura	31° 15' N	131° 05' E
	Misasa	36° 08' N	138° 21' E
Estados Unidos de América	Canberra, Australia	35° 28' S	148° 59' E
	Goldstone, California, Estados Unidos de América	35° 22' N	115° 51' W
	Madrid, España	40° 26' N	4° 17' W
	Morehead, Kentucky (Estados Unidos)	38° 11' N	83° 26' W
India	Byalalu	12° 54' N	77° 22' E
Emiratos Árabes Unidos	Dubái	25° 14' N	55° 28' E
Reino Unido	Goonhilly	50° 03' N	5° 11' W
Italia	Cerdeña	39° 30' N	9° 15' E

En cada una de estas ubicaciones hay una o más antenas, receptores y transmisores que pueden utilizarse para enlaces del servicio de investigación espacial (espacio lejano) en una o más de las bandas atribuidas. En el Cuadro 4 figuran los principales parámetros que caracterizan la calidad de funcionamiento máxima de una o más de estas estaciones. Aunque estas características no se aplican a todas las estaciones, resulta esencial que las atribuciones de banda y los criterios de protección contra la interferencia se basen en la máxima calidad de funcionamiento disponible. Ello es necesario para la explotación y protección internacionales de las misiones del servicio de investigación espacial (espacio lejano).

CUADRO 4

**Características de estaciones terrenas del servicio de investigación espacial
(espacio lejano) con antenas de 70 m**

Frecuencia (GHz)	Ganancia de antena (dBi)	Anchura del haz de la antena (grados)	Potencia del transmisor (dBW)	p.i.r.e. (dBW)	Temperatura de ruido del sistema receptor (K)	Densidad espectral de potencia de ruido del sistema receptor (dB(W/Hz))
2,110-2,120 Tierra-espacio	62	0.14	50 56 ⁽¹⁾	112 118 ⁽¹⁾	—	—
2,290-2,300 Espacio-Tierra	63	0.13	—	—	25 ⁽²⁾ 21 ⁽³⁾	–214 ⁽²⁾ –215 ⁽³⁾
7,145-7,190 Tierra-espacio	72	0.04	49 ⁽⁴⁾	121 ⁽⁴⁾	—	—
8,400-8,450 Espacio-Tierra	74	0.03	—	—	37 ⁽²⁾ 27 ⁽³⁾	–213 ⁽²⁾ –214 ⁽³⁾

CUADRO 4 (*fin*)

Frecuencia (GHz)	Ganancia de antena (dBi)	Anchura del haz de la antena (grados)	Potencia del transmisor (dBW)	p.i.r.e. (dBW)	Temperatura de ruido del sistema receptor (K)	Densidad espectral de potencia de ruido del sistema receptor (dB(W/Hz))
31,8-32,3 Espacio-Tierra	83.6	0.01	—	—	83 ⁽²⁾ 61 ⁽³⁾	−209 ⁽²⁾ −211 ⁽³⁾
34,2-34,7 Tierra-espacio	84	0.01	30	114	—	—

(1) La potencia de transmisor de 56 dBW sólo se utiliza en situaciones de emergencia del vehículo espacial.

(2) Cielo despejado, ángulo de elevación 30°, modo dúplex para recepción y transmisión simultáneas.

(3) Cielo despejado, ángulo de elevación de 30°, modo recepción solamente.

(4) Algunas estaciones terrenas siguen operando transmisores a 20 kW (43 dBW).

La calidad de recepción de las estaciones terrenas del servicio de investigación espacial (espacio lejano) se define normalmente en función de la relación entre la energía de la señal por bit y la densidad espectral de ruido necesaria para obtener una proporción de bits erróneos determinada. Otra forma de mostrar la elevada calidad de funcionamiento y sensibilidad de estas estaciones consiste en expresar la relación entre la ganancia de antena y la temperatura de ruido. Este cociente, conocido normalmente como G/T , toma un valor aproximado de 50 dB/(K) a 2,3 GHz, de 59,5 dB/(K) a 8,4 GHz y 65,2 dB/(K) a 32 GHz. Pueden compararse estos valores con la magnitud inferior y típica de 41 dB/(K) que presentan algunas estaciones terrenas del servicio fijo por satélite.

3.2 Estaciones espaciales

El tamaño y peso del vehículo espacial están limitados por la capacidad de carga útil del vehículo de lanzamiento. La potencia del transmisor de la estación espacial y el tamaño de la antena presentan limitaciones que no existen en el caso de las estaciones terrenas. La temperatura de ruido del receptor es más elevada porque normalmente se utiliza un preamplificador no refrigerado.

La estación espacial lleva un receptor-transmisor combinado denominado transpónder, que funciona en uno de los dos modos siguientes. En el modo bidireccional la portadora recibida de una estación terrena se utiliza para controlar el oscilador mediante un bucle de enganche de fase. La frecuencia de este oscilador se emplea a continuación para controlar la frecuencia del transmisor del transpónder de acuerdo con una relación fija. En el modo unidireccional la frecuencia del transmisor del vehículo espacial se controla mediante un oscilador de cristal.

En el modo bidireccional, la frecuencia y la fase de la señal transmitida por el vehículo espacial se controlan con gran precisión gracias a la extrema exactitud y precisión de la señal recibida de la estación terrena.

En el Cuadro 5 se resumen las características principales de las estaciones espaciales destinadas a la investigación del espacio lejano.

CUADRO 5

**Características típicas de las estaciones espaciales
para la investigación del espacio lejano**

Frecuencia espacio-Tierra (GHz)	Diámetro de la antena (m)	Ganancia de la antena (dBi)	Anchura de haz de la antena (grados)	Temperatura de ruido del receptor	Densidad
2,110-2,120	3,7	36	2,6	200	-206
7,145-7,190	3,7	48	0,64	330	-203
34,2-34,7	3,7	61	0,14	2 000	-196

Frecuencia Tierra-espacio (GHz)	Diámetro de la antena (m)	Ganancia de la antena (dBi)	Anchura de haz de la antena (grados)	Temperatura de ruido del receptor (K)	Densidad espectral de ruido del receptor (dB(W/Hz))
2,290-2,300	3,7	37	2,3	13	50
8,400-8,450	3,7	48	0,64	13	61
31,8-32,3	3,7	59,5	0,17	13	72,5

Debido a la limitación de la p.i.r.e. en las estaciones espaciales, la estación terrena debe disponer del receptor más sensible posible. En las estaciones espaciales pueden utilizarse receptores de menor sensibilidad gracias a que la p.i.r.e. de la estación terrena es muy alta. Los requisitos de velocidad de transmisión de datos y las consideraciones de tamaño, peso, costo, complejidad y fiabilidad determinan la temperatura de ruido del receptor para cada vehículo espacial.

La potencia del transmisor de la estación espacial viene limitada fundamentalmente por la potencia eléctrica que puede suministrar el propio vehículo espacial.

4 Métodos de radiocomunicación con el espacio lejano

Las funciones de telemedida y telemando para las radiocomunicaciones con el espacio lejano suelen realizarse mediante la transmisión de portadoras moduladas en fase. El seguimiento Doppler se efectúa por detección coherente de fase de la portadora recibida. La función de determinación de la distancia se realiza añadiendo a la modulación una señal de determinación de la distancia.

4.1 Seguimiento de portadora y medición Doppler

Cuando se recibe en la Tierra una señal transmitida por un vehículo espacial, su frecuencia original ha sido modificada por el efecto Doppler. El seguimiento en fase de la portadora permite medir el desplazamiento Doppler y, en consecuencia, la velocidad del vehículo espacial con respecto a la estación terrena. Los receptores de las estaciones terrena y espacial siguen la portadora mediante un bucle de enganche de fase o un bucle costas. Cuando el transpondedor funciona en el modo bidireccional, la frecuencia y fase en el bucle de enganche de fase de la estación espacial se utilizan para generar una o más frecuencias para el enlace espacio-Tierra. De esta forma se proporcionan a la estación terrena señales correlacionadas con la frecuencia del enlace Tierra-espacio, lo que permite realizar una medición Doppler precisa.

En el modo unidireccional, las frecuencias para el enlace espacio-Tierra se obtienen del oscilador del transpónder y la medición Doppler se basa en el conocimiento previo de la frecuencia del oscilador.

4.2 Modulación y demodulación

Los enlaces radioeléctricos utilizan la modulación de fase de la portadora de radiofrecuencia. La señal digital de datos de banda de base se utiliza para modular una subportadora que, a su vez, modula en fase a la portadora de radiofrecuencia. Para telemetría se suele utilizar como subportadora una onda cuadrada; para telemando la subportadora es a menudo sinusoidal. El índice de modulación se regula de modo que se obtenga la relación deseada entre la potencia de la portadora residual y la potencia de la banda lateral de la señal de datos. El valor de esta relación se elige de forma que sean óptimos el seguimiento de la portadora y la detección de la señal de datos en el receptor.

La demodulación de la portadora de radiofrecuencia y de la subportadora de datos se efectúa mediante bucles de enganche de fase (PLL). Para la detección de la señal de datos se utilizan por lo general técnicas de correlación y de filtros adaptados.

Los enlaces de vídeo y de audio para misiones tripuladas pueden emplear otras técnicas de modulación y demodulación. Normalmente, en estos casos se utiliza modulación y demodulación MDMG y MDP-4 (con desplazamiento) eficaces en cuanto a la utilización de la anchura de banda, con seguimiento de portadora mediante bucle Costas en vez de PLL.

4.3 Codificación

En un enlace de telecomunicación digital puede reducirse la probabilidad de error si se aumenta la anchura de banda de información. En la codificación se aprovecha este aumento traduciendo, de una manera determinada, cada bit de datos a un número mayor de símbolos de código. Como ejemplos de tipos de codificación pueden citarse los códigos de bloques y los códigos convolucionales. Después de la transmisión, los datos originales se recuperan mediante un proceso de decodificación adaptado al tipo de código. La mejora en calidad de la transmisión codificada está relacionada con la amplitud de la anchura de banda y puede variar desde 3,8 dB (codificación convolucional, proporción de bits erróneos de 1×10^{-3}) hasta más de 9 dB (codificación Turbo de índice 1/6).

4.4 Multiplexión

Las telemetrías con objeto científico y de mantenimiento pueden combinarse en un sólo flujo de datos digitales mediante multiplexión por distribución en el tiempo o pueden transmitirse mediante subportadoras separadas que se suman para formar una señal de modulación compuesta. También puede agregarse una señal de determinación de la distancia a las señales de telemetría o telemando. La amplitud de las distintas señales de datos se ajusta de manera que la potencia del transmisor quede debidamente distribuida entre la portadora y las bandas laterales de información.

4.5 Determinación de la distancia

La determinación de la distancia se realiza desde una estación terrena utilizando el transpónder de la estación espacial en el modo bidireccional. La modulación de determinación de distancia en la señal Tierra-espacio se recupera en el transpónder y se utiliza para modular la portadora del enlace espacio-Tierra. En la estación terrena se comparan los códigos de determinación de la distancia transmitido y recibido, obteniéndose así una medida del retardo de transmisión que es proporcional a la distancia.

Una limitación fundamental de la precisión en la determinación de la distancia es la posibilidad de medir la correlación de tiempo entre los códigos transmitido y recibido. En el sistema empleado actualmente se utiliza una frecuencia de código máxima de 2,062 MHz. El periodo de código es de 0,485 μ s, y se obtiene fácilmente una resolución de 1 ns, suponiendo una relación señal/ruido suficiente. Esta resolución equivale a 30 cm en una longitud de trayecto bidireccional, es decir, 15 cm de distancia, lo que satisface las actuales exigencias de exactitud de la navegación indicadas en el Cuadro 2.

Para lograr una precisión de 1 cm, que se necesitará en experimentos radiocientíficos (véase el § 2.3.2), se requiere una frecuencia de código de por lo menos 30 MHz. Los actuales sistemas de determinación de la distancia por pseudoruido del SIE en el espacio lejano utilizan una velocidad de segmentos máxima de 24 MChip/s.

4.6 Ganancia y puntería de la antena

En las antenas parabólicas que suelen utilizarse para la investigación espacial, la ganancia máxima está limitada por la exactitud con la que su superficie representa a un paraboloide perfecto. Esta limitación determina la frecuencia máxima que puede utilizar eficazmente una antena determinada.

Un factor que influye en la exactitud de la superficie, común tanto a antenas de estación terrena como de estación espacial, es la precisión con la que ha sido construida. En el caso de las antenas de estación terrena, el viento y los efectos térmicos producen deformaciones adicionales de la superficie. Cuando se hace variar el ángulo de elevación, la gravedad introduce una distorsión de la superficie, que depende de la rigidez de la estructura de soporte.

En las antenas de estación espacial, el tamaño está limitado por la masa admisible, por el espacio disponible en el vehículo de lanzamiento y por la tecnología de construcción de las antenas desplegables. Los efectos térmicos provocan distorsión en las superficies de las antenas de estación espacial.

La ganancia máxima utilizable de las antenas está limitada por la posibilidad de apuntarlas con exactitud. La anchura del haz debe ser la adecuada para permitir una cierta tolerancia angular en la puntería. Todos los factores que distorsionan la superficie reflectora pueden influir también en la precisión de la puntería. La precisión del sistema de control de actitud del vehículo espacial (que depende a menudo de la cantidad de propulsante que puede llevar) es un factor que interviene en la puntería de la antena de la estación espacial.

La precisión con la que se conocen las ubicaciones de las estaciones terrena y espacial, una con respecto a la otra, influye en la anchura del haz mínima y en la ganancia máxima utilizables.

El Cuadro 6 muestra límites típicos de las características de la antena.

CUADRO 6

Limitaciones actuales de la precisión y la ganancia máxima de antena

Parámetro limitante	Antenas de estación espacial		Antenas de estación terrena	
	Valor máximo típico del parámetro	Ganancia máxima	Valor máximo típico del parámetro	Ganancia máxima
Precisión de la superficie parabólica	0,24 mm de media cuadrática en un reflector de 3,7 m de diámetro	61 dBi ⁽¹⁾ a 34 GHz	0,53 mm de media cuadrática en un reflector de 70 m de diámetro	84 dBi ⁽¹⁾ a 34 GHz
Precisión de puntería	$\pm 0,15^\circ$ (3σ)	56 dBi ⁽²⁾	$\pm 0,005^\circ$ (3σ)	82,5 dBi ⁽²⁾

⁽¹⁾ La ganancia a otras frecuencias será menor.

⁽²⁾ Ganancia de una antena con anchura del haz de potencia mitad igual a 2 veces la precisión de puntería. La anchura del haz de una antena de mayor ganancia resultaría demasiado estrecha con respecto a la precisión de puntería.

4.7 Técnicas de radionavegación adicionales

Las mediciones Doppler y de determinación de la distancia proporcionan la información básica de seguimiento necesaria para la navegación. Se han desarrollado técnicas adicionales para mejorar la precisión de la navegación.

4.7.1 Calibración de la velocidad de propagación al ser afectada por las partículas cargadas

Las mediciones Doppler y de determinación de la distancia resultan afectadas por las variaciones de la velocidad de propagación de las ondas radioeléctricas causadas por los electrones libres a lo largo del trayecto de transmisión. Estos electrones existen con diversas densidades en el espacio y en las atmósferas planetarias, y son particularmente abundantes cerca del Sol. A menos que se tengan en cuenta, estas variaciones de la velocidad de propagación pueden introducir errores en los cálculos de navegación.

Las partículas cargadas provocan un aumento de la velocidad de fase y una disminución de la velocidad de grupo. El efecto de las partículas cargadas puede determinarse comparando la variación de la distancia con el efecto Doppler integrado en un periodo de tiempo. El efecto sobre la velocidad de propagación es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia. Esta dependencia de la frecuencia puede utilizarse para aumentar la exactitud de calibración. Se pueden realizar determinaciones de la distancia en modo bidireccional así como seguimiento Doppler con señales simultáneas transmitidas por el enlace espacio-Tierra en dos o más bandas separadas. Los efectos de las partículas cargadas son de magnitud diferente en las distintas bandas y esta diferencia se aprovecha para mejorar la calibración.

El efecto de las partículas cargadas sobre la fase y la velocidad de grupo así como su influencia en la medición de la distancia se facilitan en el Informe UIT-R SA.2177.

4.7.2 Interferometría de línea de base muy larga (VLBI)

La exactitud de la navegación espacial depende del conocimiento preciso de la ubicación de la estación terrena con respecto al sistema de coordenadas de navegación. Un error de 3 m en la ubicación supuesta de la estación puede provocar un error de 700 km en la posición calculada de un vehículo espacial a la distancia de Saturno. La VLBI proporciona un medio de mejorar la estimación de la ubicación de una estación utilizando una fuente radioeléctrica celeste (cuásar) como fuente de señales en un punto fijo de la esfera celeste. Es posible registrar las señales del cuásar de tal forma que se pueda determinar, con gran exactitud, la diferencia entre los instantes de recepción en dos estaciones muy separadas entre sí. Efectuando un cierto número de mediciones, pueden conocerse las ubicaciones de las estaciones con una exactitud relativa de 10 cm. Actualmente se utilizan para las mediciones de VLBI frecuencias próximas a 2,8 y 32 GHz.

La técnica VLBI se utiliza también para medir directamente el ángulo de declinación del vehículo espacial. Dos estaciones terrenas cuyas ubicaciones se conocen con exactitud, separadas por una gran distancia en el sentido Norte-Sur, miden la distancia al vehículo espacial. Con estos datos puede calcularse la declinación con gran precisión.

Una tercera aplicación del método VLBI, llamada DDOR, sirve para mejorar la exactitud de las mediciones de posición angular del vehículo espacial. Dos o más estaciones terrenas observan alternativamente una señal del vehículo espacial y una señal del cuásar. Si se conoce la hora, la ubicación de la estación y el efecto de la rotación de la Tierra sobre las señales recibidas, puede determinarse la posición angular del vehículo espacial con respecto a las coordenadas celestes. Cuando se hayan desarrollado plenamente estas técnicas se obtendrá una mejora que decuplicará la precisión actual de 0,002 segundo de arco (equivalente a 10 nrad). Esta mayor exactitud permitirá una navegación más precisa y, como consecuencia, una inserción más eficiente de la órbita planetaria.

5 Análisis de la calidad de funcionamiento y márgenes de diseño

En el diseño, desarrollo y explotación de las comunicaciones de vehículos espaciales, se utilizan balances de enlace para representar valores nominales de potencia del transmisor, potencia de ruido del sistema, ganancias de antena, pérdidas de hardware, pérdidas de propagación y otros parámetros del enlace con miras a determinar la potencia de la señal y el ruido en el receptor y estimar el margen del enlace. Este margen muestra la fiabilidad del enlace y su tolerancia a las variaciones de los parámetros del enlace y a la interferencia procedente de otras fuentes.

En el Cuadro 7 figura un ejemplo del balance de un enlace utilizado para un enlace de telemetría a gran velocidad del vehículo espacial Voyager desde Júpiter. Los balances del enlace pueden diferir para otros vehículos espaciales y en función de la distancia a la Tierra. Para el telemando y la determinación de la distancia se efectúan análisis similares. Las características de las estaciones terrena y espacial indicadas anteriormente se utilizan como base para calcular un margen para la detección de datos de telemetría y el seguimiento de portadora.

CUADRO 7

Presupuesto del enlace. Vehículo espacial-Tierra desde Júpiter

Misión: Voyager Júpiter/Saturno 1977 Modo: Telemetría, 115,2 kbit/s, codificada 7-1/2, portadora de 8,45 GHz			
Parámetros del transmisor			
Potencia RF (21 W)	dBW		13,2
Pérdida del circuito	dB		-0,2
Ganancia de antena (3,7 m)	dBi		48,1
Pérdida por errores de puntería	dB		-0,2
Parámetros del trayecto			
Pérdida en el espacio libre entre antenas isotrópicas (8,45 GHz, $9,3 \times 10^8$ km)	dB		-290,4
Parámetros del receptor			
Ganancia de antena (70 m, ángulo de elevación 30°)	dBi		73,4
Pérdida por errores de puntería	dB		-0,3
Atenuación por efectos meteorológicos	dB		-0,1
Densidad espectral de potencia del ruido del sistema (T=22,6 K)	dB(W/Hz)		-215,1
Potencia total			
Pérdida del enlace	dB		-169,7
Potencia recibida	dBW		-156,5
Características de seguimiento de la portadora (en modo bidireccional)			
Relación potencia de portadora/potencia total	dB		-15,4
Potencia de portadora recibida	dBW		-171,9
Anchura de banda del ruido de la portadora en el umbral	Hz		10
Potencia de ruido	dBW		-205,1
Relación señal/ruido en el umbral	dB		20
Potencia de portadora en el umbral	dBW		-185,1
Margen del enlace del seguimiento de portadora	dB		13,2

CUADRO 7 (*fin*)

Misión: Voyager Júpiter/Saturno 1977 Modo: Telemedida, 115,2 kbit/s, codificada 7-1/2, portadora de 8,45 GHz		
Características de detección de datos		
Relación potencia de datos/potencia total	dB	−0,3
Pérdidas de recepción y detección de datos	dB	−0,5
Potencia de datos recibida	dBW	−157,3
Anchura de banda del ruido (anchura de banda efectiva de ruido para detección de datos a 115,2 kbit/s mediante filtro adaptado)	dB(Hz)	50,6
Potencia de ruido	dBW	−164,5
Relación señal/ruido umbral (proporción de bits erróneos: 5×10^{-3} , 7-1/2 codificado)	dB	2,3
Potencia de datos en el umbral	dBW	−162,2
Margen del enlace de la detección de datos	dB	4,9

Un punto muy importante en el diseño de las misiones para el espacio lejano es que el margen de enlace de detección de datos es relativamente pequeño (4,9 dB en el ejemplo presentado). Este margen es consecuencia de la necesidad de obtener de cada vehículo espacial el máximo provecho científico y se reduce a medida que aumenta la distancia. Para que el enlace de comunicación de Júpiter tenga un margen de 10 dB, la relación de datos de telemetría necesita reducirse de 115,2 kbit/s a 35,5 kbit/s. Si en el diseño se previera un margen de seguridad 10 dB mayor, el volumen de datos de telemedida se vería reducido por un factor de 10. El inconveniente de un sistema con un margen tan pequeño de enlace es que puede ser fácilmente afectado por interferencias perjudiciales y, en las bandas por encima de 2 GHz, puede ser menos fiable a causa de las condiciones meteorológicas.