

RECOMENDACIÓN UIT-R SA.1014-1

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

(1994-2006)

Cometido

Esta Recomendación describe brevemente algunas características esenciales de las telecomunicaciones de espacio lejano. Estas características influyen o determinan los requisitos para las atribuciones en la banda, la coordinación, la compartición de la banda y la protección contra la interferencia.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

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

recomienda

1 que se tengan en cuenta los requisitos y características descritos en el Anexo 1 para las telecomunicaciones con el espacio lejano referentes a la investigación del espacio lejano y su interacción con otros servicios.

Anexo 1**Requisitos de telecomunicaciones para la investigación del espacio lejano con vuelos tripulados y no tripulados****1 Introducción**

El presente Anexo expone algunas características de las misiones de investigación del espacio lejano, los requisitos funcionales y de calidad de las telecomunicaciones 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 la Recomendación UIT-R SA.1013 figuran consideraciones relativas a los requisitos y características de la anchura de banda.

2 Requisitos de telecomunicaciones

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 comunicaciones 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 con el espacio lejano es consecuencia de las diversas misiones en curso y proyectadas. Como muchas 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 telemetría

La telemetría 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 telemetría sobre la condición del citado vehículo espacial. Ello exige contar con un enlace de telecomunicaciones 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 (véanse las Recomendaciones UIT-R SA.1012 y UIT-R SA.1013).

La telemetría 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 gamas típicas de velocidades de transmisión de datos para la telemetría científica y de mantenimiento.

CUADRO 1

Velocidades binarias necesarias para la investigación del espacio lejano

Sentido y función	Característica del enlace		
	Independiente de las condiciones meteorológicas	Normal	Velocidad binaria elevada
Tierra-espacio			
Telemando (bit/s)	1-1 000	1-1 000	1-2 000
Programación de computador (kbit/s)	1-50	1-100	1-200
Telefonía (kbit/s)	45	45	45
Televisión (Mbit/s)	1-4	0,2-12	6-100
Determinación de la distancia (Mbit/s)	1	10	100
Espacio-Tierra			
Telemetría para mantenimiento (bit/s)	8-500	8-500	$8-2 \times 10^5$
Datos científicos (kbit/s)	0,008-115	1-500	$40-3 \times 10^5$
Telefonía (kbit/s)	45	45	45
Televisión (Mbit/s)	0,2-0,8	0,2-8	6-1 000
Determinación de la distancia (Mbit/s)	1	10	100

La capacidad del enlace de teledatada 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 teledatada 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 teledatada 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 teledatada. La señal codificada exige una anchura de banda de transmisión más amplia. La utilización de teledatada 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 predeterminarse.

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 teledatada 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 precisión 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

2.3.2 Radiociencia

Los enlaces de telecomunicación 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 ó 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 telefonía y televisión 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 telecomunicaciones, 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 telecomunicaciones 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 para el 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 para el espacio lejano

Administración	Ubicación	Latitud	Longitud
Agencia Espacial Europea	Cebreros (España)	40° 27' N	4° 22' E
	New Norcia (Australia)	31° 20' N	116° 11' 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
Japón	Usuda, Nagano	36° 08' N	138° 22' 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

En cada una de estas ubicaciones hay una o más antenas, receptores y transmisores que pueden utilizarse para enlaces con el 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, es 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 en el espacio lejano.

CUADRO 4

Características de estaciones terrenas para el 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))
2,1 Tierra-espacio	62	0,14	50 56 ⁽¹⁾	112 118 ⁽¹⁾	--	--
2,3 Espacio-Tierra	63	0,13	--	--	25 ⁽²⁾ 21 ⁽³⁾	-214 ⁽²⁾ -215 ⁽³⁾
7,2 Tierra-espacio	72	0,04	50	115	--	--
8,45 Espacio-Tierra	74	0,03	--	--	37 ⁽²⁾ 27 ⁽³⁾	-213 ⁽²⁾ -214 ⁽³⁾
32 Espacio-Tierra	83,6 ⁽⁴⁾	0,01 ⁽⁴⁾	--	--	83 ⁽²⁾⁽⁴⁾	-209 ⁽²⁾⁽⁴⁾
34,5 Tierra-espacio	84 ⁽⁴⁾	0,01 ⁽⁴⁾	Por determinar	Por determinar	61 ⁽³⁾⁽²⁾	-211 ⁽³⁾⁽⁴⁾

(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) Estimación.

La calidad de recepción de las estaciones terrenas para el 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⁻¹) a 2,3 GHz y de 59,5 dB(K⁻¹) a 8,4 GHz. Pueden compararse estos valores con la magnitud inferior y típica de 41 dB(K⁻¹) 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 no se recibe señal de la estación terrena y 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
2,1	3,7	36	2,6	1 200	-198
7,2	3,7	48	0,64	390	-202
34,5	3,7	61	0,14	Por determinar	Por determinar

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))
2,3	3,7	37	2,3	13	50
8,45	3,7	48	0,64	13	61
32	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 telecomunicación con el espacio lejano

Las funciones de teledirigida y telemando para las telecomunicaciones 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 televisión y de telefonía 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 solo 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 4 ns, suponiendo una relación señal/ruido suficiente. Esta resolución equivale a 120 cm en una longitud de trayecto bidireccional, es decir, 60 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 futuros experimentos radiocientíficos (véase el § 2.3.2), se requiere una frecuencia de código de por lo menos 30 MHz.

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 parabolóide 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 desplegadas. 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	66 dBi ⁽¹⁾ a 100 GHz	0,53 mm de media cuadrática en un reflector de 70 m de diámetro	83,6 dBi ⁽¹⁾ a 32 GHz
Precisión de puntería	$\pm 0,15^\circ$ (3σ)	55 dBi ⁽²⁾	$\pm 0,005^\circ$ (3σ)	75 dBi ⁽²⁾

⁽¹⁾ La ganancia a otras frecuencias será menor.

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 y su influencia en la medición de la distancia se estudian en la Recomendación UIT-R SA.1012.

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 y 8 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 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 muy significativa con relación a la precisión actual de 0,01 segundo de arco. Esta mayor exactitud permitirá una navegación más precisa.

5 Análisis de la calidad de funcionamiento y márgenes de diseño

En el Cuadro 7 figura el balance de un enlace utilizado para el análisis de la calidad de funcionamiento. El ejemplo presentado corresponde a un enlace de teledida a gran velocidad desde Júpiter. 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 de calidad de funcionamiento para cada función de telecomunicación.

CUADRO 7

Balance general del enlace. Vehículo espacial-Tierra desde Júpiter

Misión: Voyager Júpiter/Saturno 1977 Modo: Telemetrada, 115,2 kbit/s, codificada, 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 (dB) (8,45 GHz, $9,3 \times 10^8$ km) (dB)	-290,4
Parámetros del receptor	
Ganancia de antena (64 m, ángulo de elevación 30°) (dBi)	72,0
Pérdida por errores de puntería (dB)	-0,3
Atenuación por efectos meteorológicos (dB)	-0,1
Densidad espectral de potencia del ruido del sistema (22,6 K) (dB(W/Hz))	-215,1
Potencia total	
Pérdida del enlace (dB)	-171,1
Potencia recibida $P(T)$ (dBW)	-157,9
Características de seguimiento de la portadora (en modo bidireccional)	
Relación potencia de portadora/potencia total (dB)	-15,4
Potencia de portadora recibida (dBW)	-173,3
Anchura de banda del ruido de la portadora en el umbral ($B = 10$ Hz) ($10 \log B$)	10,0
Potencia de ruido (dBW)	-205,1
Relación señal/ruido en el umbral (dB)	20
Potencia de portadora en el umbral (dBW)	-185,1
Margen de funcionamiento (dB)	11,8
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)	-158,7
Anchura de banda del ruido (anchura de banda efectiva de ruido para detección de datos a 115,2 kbit/s mediante filtro adaptado) (dB)	50,6
Potencia de ruido (dBW)	-164,5
Relación señal/ruido umbral (proporción de bits erróneos: 5×10^{-3}) (dB)	2,3
Potencia de datos en el umbral (dBW)	-162,2
Margen de calidad de funcionamiento (dB)	3,5

Un punto muy importante en el diseño de las misiones para el espacio lejano es que el margen de la calidad de funcionamiento en telemetrada es muy pequeño (3,5 dB en el ejemplo presentado). Este escaso margen es consecuencia de la necesidad de obtener de cada vehículo espacial el máximo provecho científico. Si en el diseño se previera un margen de seguridad 10 dB mayor, el volumen de datos de telemetrada se vería reducido por un factor de 10. El inconveniente de un sistema con un margen tan pequeño de calidad de funcionamiento 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.