



MANUAL DE COMUNICACIONES PARA LA INVESTIGACIÓN ESPACIAL

EDICIÓN DE 2014
OFICINA DE RADIOCOMUNICACIONES



Manual de Comunicaciones para la investigación espacial

Edición of 2014

Radiocommunication Bureau



PREFACIO

El Manual sobre comunicaciones para la investigación espacial ha sido elaborado por expertos del Grupo de Trabajo 7B de la Comisión de Estudio 7 de Radiocomunicaciones (Servicios científicos). La versión original fue creada bajo la presidencia del Sr. S. Taylor (Estados Unidos de América), Presidente del citado Grupo de Trabajo 7B. Esta última versión, elaborada bajo la presidencia del Sr. B. Kaufman (Estados Unidos de América), Presidente del Grupo de Trabajo 7B, incorpora información sobre las aplicaciones y los adelantos tecnológicos en las comunicaciones para la investigación espacial, así como los cambios introducidos en las Recomendaciones e Informes del UIT-R desde que se publicara la primera edición en 2002.

El Manual no pretende ser un libro de referencia sobre la investigación espacial sino que se refiere principalmente a los aspectos del servicio de investigación espacial relativos a la gestión de la utilización del espectro radioeléctrico para minimizar la interferencia entre servicios de radiocomunicaciones cuando interviene el servicio de investigación espacial. En cuatro capítulos, el Manual introduce al lector sobre los principios fundamentales del servicio de investigación espacial. Cubre temas tales como las funciones de los sistemas de investigación espacial y las aplicaciones técnicas, las bandas de frecuencias preferidas y los asuntos asociados a la compartición del espectro radioeléctrico con otros servicios. El Apéndice 1 enumera Recomendaciones UIT-R referentes a la investigación espacial para posterior referencia.

Espero que el presente Manual resulte útil a gestores del espectro y a ingenieros de radiocomunicaciones.

François Rancy
Director de la Oficina de
Radiocomunicaciones

Prólogo

El lanzamiento de Sputnik-1, primer objeto realizado por el hombre y puesto en órbita alrededor de la Tierra el 4 de octubre de 1957, nos introdujo en la era espacial. La necesidad de comunicar con el vehículo espacial dio lugar a la creación de un servicio radioeléctrico que actualmente se conoce como el servicio de investigación espacial. Hoy en día, agencias espaciales y administraciones en todo el mundo llevan a cabo misiones de investigación espacial. El servicio de investigación espacial se define en el Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) de la UIT como «un servicio de radiocomunicación que utiliza vehículos espaciales u otros objetos espaciales para fines de investigación científica o tecnológica».

La Comisión de Estudio 7 de Radiocomunicaciones (Servicios científicos) (CE 7) se creó en una reestructuración realizada en 1990 durante la Asamblea Plenaria del CCIR en Dusseldorf. Muchas de las actividades de la Comisión de Estudio 7 están asociadas con las previsiones anticipadas de utilización del espectro radioeléctrico para lograr objetivos científicos.

La Comisión de Estudio 7 incluye actualmente algunos Grupos de Trabajo (GT) que tratan asuntos técnicos relativos a disciplinas específicas bajo la denominación de servicios científicos. La investigación espacial y sus aplicaciones son responsabilidad del Grupo de Trabajo 7B e incluyen estudios de los enlaces de comunicaciones necesarios para soportar y mantener la operación de las misiones espaciales hasta los confines del sistema solar e incluso más allá.

Durante los pasados cuarenta años se han realizado enormes avances en numerosas disciplinas científicas y técnicas que han beneficiado a la humanidad y han aumentado nuestro conocimiento y nuestra comprensión del espacio en el que vivimos. Dichos éxitos incluyen los vehículos espaciales de exploración robótica de los planetas alcanzando incluso los límites exteriores de nuestro sistema solar; aterrizaje de misiones tripuladas en la Luna; construcción y explotación de la estación espacial MIR y satélites retransmisores que proporcionan comunicaciones espaciales mejoradas. Los proyectos actuales incluyen la construcción de una estación espacial internacional y el envío de misiones tripuladas al planeta Marte.

Las continuas mejoras y logros de la investigación espacial han dado lugar a nuevas actividades y a requisitos adicionales y a una demanda de capacidad y fiabilidad cada vez mayor de las comunicaciones para la investigación espacial. Los recursos orbitales y de espectro que constituyen los fundamentos de todas las comunicaciones espaciales están cada vez más solicitados por nuevos servicios y sistemas. Es necesaria una comprensión detallada de los sistemas espaciales y de sus requisitos radioeléctricos, para lograr la compartición de estos recursos limitados y satisfacer al mismo tiempo las necesidades de hoy y de los próximos años.

Aunque el desarrollo de Recomendaciones fue y sigue siendo el eje principal de las actividades de la Comisión de Estudio, es evidente que los expertos que trabajan en estos asuntos en la Comisión de Estudio tienen mucha información básica que ofrecer a sus colegas científicos y asimilados, que dependen de los datos de la investigación espacial para resolver cuestiones científicas fundamentales y hacer progresar el conocimiento global humano del entorno espacial y del origen del universo. Por ello se decidió preparar y publicar este Manual de forma que todos los usuarios de estas normas pudieran comprender mejor los sistemas de comunicaciones de investigación espacial, con el fin de diseñar y aplicar mejor estas poderosas herramientas.

Este Manual está concebido para proporcionar al lector una comprensión general del servicio de investigación espacial. El Manual proporciona información básica sobre los requisitos técnicos y de espectro necesarios para soportar los numerosos y diversos programas, misiones y actividades de la investigación espacial. El Manual está escrito fundamentalmente para los funcionarios gubernamentales, para los miembros de las Comisiones de Estudio de Radiocomunicaciones y para el personal de las agencias implicadas en asuntos de gestión del espectro. Este Manual también servirá para ilustrar a otros sectores, como pueden ser estudiantes de universidad u otros grupos de personas interesadas en adquirir conocimientos sobre algunos aspectos de las comunicaciones del servicio de investigación espacial.

Como Presidente de la Comisión de Estudio 7, me corresponde el honor y el placer de presentar este Manual a la comunidad de usuarios de las normas sobre investigación espacial quienes, estoy seguro, lo considerarán una referencia inestimable para su propio trabajo.

El Manual no se podría haber terminado sin las contribuciones de muchas administraciones que participan en la Comisión de Estudio 7. Sin embargo, resultó fundamental el trabajo de los Relatores para las diversas secciones del Manual y es preciso agradecer en particular el trabajo de la Sra. S. Taylor (Presidente del GT 7B, Estados Unidos de América), del Sr. V. Meens (Vicepresidente de la CE 7, Francia), del Sr. R. Jacobsen (Vicepresidente de la CE 7, Australia), de la Sra. S. Kimura (Japón) y de los Sres. R. Andrews, D. Bathker y B. Younes (Estados Unidos de América). También debemos agradecer particularmente al Sr. A. Nalbandian de la Oficina de Radiocomunicaciones que ha tenido un protagonismo fundamental en el desarrollo de este Manual.

R.M. Taylor

Presidente de la Comisión
de Estudio 7

Prólogo a la segunda edición

Desde que se publicara por primera vez el Manual sobre comunicaciones para la investigación espacial se han producido muchos cambios en este campo. Durante este periodo, la estación espacial internacional está totalmente operativa y muchas administraciones tienen programas espaciales activos. Cada vez son más las agencias espaciales que participan en la exploración con robots de la Luna y Marte, con el fin de enviar más adelante humanos a explorar y descubrir Marte.

Acceso al espacio para investigación científica es ahora más fácil con las nuevas tecnologías, como los nanosatélites y picosatélites, que debido a los costes reducidos y al menor peso han disminuido los obstáculos al desarrollo y lanzamiento de satélites.

El aumento en las actividades de investigación espacial ha conllevado la necesidad de velocidades de datos más elevadas para poder llevar a cabo misiones complejas. Este aumento de la actividad y expansión de los datos de misiones ha convertido la compartición de espectro en un aspecto esencial de las comunicaciones para la investigación espacial. La compartición de espectro ha mejorado gracias a la utilización de diversas técnicas, como las modulaciones de orden superior, que aumentan la eficiencia de ancho de banda, y la utilización de frecuencias más altas, que mejora la directividad.

Otro importante adelanto en las comunicaciones para la investigación espacial ha sido un aumento del interés y la utilización del espectro dentro de la gama óptica.

En esta nueva versión del Manual se mejora la información básica relativa a los requisitos técnicos y de espectro necesarios para dar soporte a los muy diversos programas, misiones y actividades de investigación espacial. Cabe esperar que este Manual ayude a comprender algunos de los aspectos del servicio de investigación espacial relativos a la comunicación.

La revisión del presente Manual no hubiera sido posible sin las contribuciones de muchas administraciones que participan en la Comisión de Estudio 7. No obstante, algunas personas merecen reconocimiento a título personal por su importante contribución, a saber: el Sr. B. Kaufman (Presidente del GT 7B, Estados Unidos de América), el Sr. E. Vassallo (ESA), el Sr. V.S. Galbraith (Estados Unidos de América), la Sra. P. Dumit (Estados Unidos de América), y los Srs. T. Berman, G. Feldhake y S. Kayalar, S. Asmar, F. Manshadi, T. VonDeak (Estados Unidos de América). Especial agradecimiento merece el Sr. V. Nozdrin de la Oficina de Radiocomunicaciones por su indispensable papel en la elaboración del presente Manual.

V. Meens

Presidente de la Comisión
de Estudio 7

ÍNDICE

Página

CAPÍTULO 1 – Introducción al servicio de investigación espacial.....	1
1.1 Investigación espacial – Visión general.....	1
1.2 Características de las misiones de investigación espacial.....	2
1.2.1 Duración de las misiones de investigación espacial.....	2
1.2.2 Órbitas de las misiones de investigación espacial.....	2
1.2.3 Tipos de misiones de investigación espacial.....	4
1.3 Sistemas de investigación espacial	5
1.3.1 Segmento terreno	5
1.3.2 Segmento espacial.....	7
CAPÍTULO 2 – Funciones de comunicación y de seguimiento e implementaciones técnicas de los vehículos espaciales	11
2.1 Funciones	11
2.1.1 Transmisiones de telemando	11
2.1.2 Transmisiones de teledata del vehículo espacial.....	11
2.1.3 Transmisiones de teledata de la misión.....	11
2.1.4 Seguimiento	11
2.1.5 Radiociencia.....	12
2.2 Implementación.....	12
2.2.1 Fiabilidad, requisitos de proporción de bits erróneos y márgenes de enlace.....	12
2.2.2 Requisitos de velocidad de datos y de anchura de banda.....	13
2.2.3 Relaciones entre ambos sentidos.....	13
2.2.4 Multiplexación	14
2.2.5 Corrección de errores y codificación mediante ruido seudoaleatorio	14
2.2.6 Técnicas de modulación.....	15
2.2.7 Adquisición	16
2.2.8 Técnicas de seguimiento	16

CAPÍTULO 3 – Consideraciones sobre las bandas de frecuencias para misiones de investigación espacial	19
3.1 Consideraciones sobre la misión.....	19
3.2 Consideraciones sobre los equipos	19
3.3 Efectos de la propagación y de la radiación.....	20
3.5 Atribuciones al servicio de investigación espacial.....	22
CAPÍTULO 4 – Criterios de protección para la investigación espacial y consideraciones sobre la compartición de frecuencias.....	23
4.1 Consideraciones sobre las interferencias a la investigación espacial.....	23
4.2 Criterios de protección para el servicio de investigación espacial.....	24
4.3 Consideraciones sobre la compartición para el servicio de investigación espacial.....	24
4.3.1 Interferencias producidas por estaciones terrenas de investigación espacial.....	25
4.3.2 Interferencias producidas en vehículos espaciales de investigación espacial.....	26
4.3.3 Interferencias producidas por vehículos espaciales de investigación espacial.....	26
4.3.4 Interferencias a estaciones terrenas de investigación espacial	27
4.3.5 Límites de emisiones no deseadas especificados por la UIT	27
APÉNDICE 1	29
APÉNDICE 2	33

CAPÍTULO 1

Introducción al servicio de investigación espacial

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) permite en todo el mundo la mejora y la utilización racional de los sistemas de telecomunicaciones. El Sector de Radiocomunicaciones de la UIT (UIT-R) tiene como objeto asegurar una utilización racional, justa, eficaz y económica de los recursos naturales limitados del espectro de frecuencias radioeléctricas y de las órbitas de los satélites e incluye la gestión del servicio de investigación espacial (SIE) entre otros servicios científicos. El servicio de investigación espacial utiliza atribuciones de frecuencias específicas como se indica en el Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT (RR) (Véase el Apéndice 2). La utilización de las atribuciones al servicio de investigación espacial se indica más detalladamente en la Serie SA de las Recomendaciones UIT-R (véase el Apéndice 1), basándose en las características técnicas y en los procedimientos de explotación.

1.1 Investigación espacial – Visión general

Los sistemas del servicio de investigación espacial dan lugar a un conjunto de disciplinas científicas y de programas tecnológicos que benefician a la humanidad. Las disciplinas científicas proporcionan información relativa al sistema solar, la naturaleza y la estructura del universo y el origen y destino de la materia, e incluyen:

- física solar-terrestre,
- física espacial,
- investigación de sistemas planetarios.

Los programas de interacción entre el Sol y la Tierra se centran en estudios del Sol, de la actividad solar y de su influencia en la Tierra. Estos estudios se llevan a cabo utilizando una red de vehículos espaciales científicos ubicados en diversas regiones del espacio interplanetario, normalmente entre el Sol y la Tierra, y equipados con un conjunto de instrumentos científicos para observar y detectar la radiación electromagnética y las partículas y ondas de plasma solar.

La investigación de la física espacial se dedica al estudio de las leyes fundamentales de la física en nuestro sistema solar y nos proporciona información que se utiliza para mejorar el diseño de los vehículos espaciales, su instrumentación y su capacidad de navegación.

Se estudian los planetas, los satélites de los planetas, los asteroides y los cometas para mejorar el conocimiento sobre el origen y evolución de nuestro sistema solar. Los vehículos espaciales, las sondas y los vehículos que se desplazan sobre las superficies planetarias nos proporcionan una amplia información sobre los planetas y sus satélites en nuestro sistema solar.

Los programas tecnológicos para la investigación espacial se centran en el desarrollo y validación en el espacio de las tecnologías avanzadas necesarias para:

- la fabricación y montaje de estructuras espaciales;
- la construcción de sistemas electromecánicos;
- el estudio del comportamiento de los fluidos y de los fenómenos de transporte;
- la robótica para la construcción de estructuras y el servicio a satélites en órbita;
- las técnicas de procesamiento y fabricación en el espacio.

En particular, el estudio del entorno espacial en microgravedad para fines científicos y comerciales desarrolla y mejora la capacidad del hombre para vivir y trabajar en el espacio durante largos períodos de tiempo e incrementa nuestro conocimiento sobre la ciencia de los materiales y las ciencias biomédicas.

Los diferentes tipos de sistemas de investigación espacial utilizados para dar soporte a la investigación científica y tecnológica, tanto cerca de la Tierra como en el espacio lejano, incluyen vehículos misiones tripuladas (exploración humana, transporte de tripulación y personal a bases científicas, realización de

experimentos e investigación en el espacio) y no tripulados (por ejemplo, utilización de vehículos espaciales robóticos para la recopilación de muestras físicas, suministro o servicio de naves espaciales de investigación y utilización de vehículos espaciales para la recopilación de datos detectados y observados), redes de comunicaciones en la superficie de la Tierra y redes de comunicaciones situadas en la órbita de los satélites geoestacionarios o más allá. Las misiones de investigación espacial destinadas a una distancia de la Tierra superior a 2×10^6 km se consideran misiones en el «espacio lejano». Debido a sus necesidades particulares, se han establecido disposiciones particulares del espectro radioeléctrico para los sistemas del espacio lejano con el fin de permitir la comunicación a las grandes distancias necesarias. Debido a la masa, el volumen y los costes, en todas las fases de las misiones en el espacio lejano se utilizan los mismos equipos y el mismo espectro.

Las fases de las misiones de investigación espacial incluyen una comprobación antes del lanzamiento, las operaciones de lanzamiento, las operaciones de transferencia, las operaciones en órbita y, como en el caso de las misiones tripuladas y robóticas, el regreso a la Tierra y las operaciones de aterrizaje. Para tener éxito, cada fase necesita sistemas de comunicaciones y de seguimiento especializados. Las operaciones de lanzamiento utilizan sistemas de medición de distancia y de telemando y destrucción durante la fase crítica de lanzamiento y para operaciones inesperadas. Las operaciones de transferencia necesitan datos de telemando, teledata y seguimiento para asegurar que el vehículo espacial alcanza la órbita adecuada. Las operaciones en órbita necesitan a menudo comunicaciones espacio-espacio entre los vehículos espaciales que funcionan en colaboración, así como comunicaciones con la Tierra, ya sean directas o mediante satélites de comunicaciones geoestacionarios, denominados satélites de retransmisión de datos. Para las misiones tripuladas, las funciones de comunicación incluyen voz y vídeo así como datos de telemando, teledata y seguimiento. Para misiones robóticas quizá sean también necesarios datos de vídeo además de los de telemando, teledata y seguimiento. En el caso de misiones planetarias, pueden necesitarse comunicaciones entre vehículos espaciales en órbita y vehículos espaciales en la superficie además de las comunicaciones entre el vehículo espacial planetario y la Tierra.

1.2 Características de las misiones de investigación espacial

1.2.1 Duración de las misiones de investigación espacial

La duración de una misión de investigación espacial está constituida fundamentalmente por la duración del vuelo (tiempo transcurrido entre el lanzamiento y la llegada al destino final) y la duración real de la misión (el periodo de tiempo necesario para llevar a cabo el experimento, la adquisición de datos y completar los objetivos de la misión). Para misiones tripuladas y envío de muestras, la duración de la misión incluirá también el tiempo necesario para la vuelta a la Tierra. En muchos casos los vehículos espaciales siguen funcionando mucho más allá de su vida prevista y siguen proporcionando datos valiosos a la comunidad de investigadores espaciales.

Para la mayoría de las misiones en el espacio cercano a la Tierra, la duración del vuelo es normalmente una parte pequeña de la duración total de la misión. La duración real de la misión para misiones robóticas cercanas a la Tierra puede variar entre algunos meses y algunos años. Los satélites de retransmisión de datos y las estaciones espaciales constituyen una excepción, al requerir un período de tiempo de explotación de entre 10 y 15 años. Para misiones tripuladas en las regiones orbitales y lunar, la duración real de la misión puede oscilar entre unos cuantos días y algunos meses.

La duración del vuelo de las misiones de espacio lejano puede ser una gran parte de la duración total de la misión. Por ejemplo, una misión al planeta Saturno, distante unos $1,58 \times 10^9$ km, puede tener una duración del vuelo de 6 a 7 años. Durante el vuelo se comunica periódicamente con el vehículo espacial para conocer su estado y el de sus cargas útiles. La duración real de la misión para misiones de espacio lejano típicas es generalmente del orden de unos pocos años. La duración de las misiones robóticas y tripuladas a asteroides, a Marte u a otros cuerpos celestes, será del orden de meses o años.

1.2.2 Órbitas de las misiones de investigación espacial

Las actividades de la investigación espacial se realizan utilizando algunos tipos diferentes de órbitas. El tipo de órbita elegido y sus características se basan en los requisitos y la optimización de la misión de investigación espacial. Las órbitas circulares se utilizan extensamente para la mayoría de las misiones de

investigación espacial. Estas órbitas se caracterizan por tener apoápsides y peri ápsides idénticos, es decir, la altitud del vehículo espacial es constante en relación con la superficie de la Tierra o del planeta que se está orbitando. Para misiones de investigación espacial llevadas a cabo alrededor de la Tierra, las órbitas están generalmente inclinadas sobre el plano ecuatorial y tienen altitudes que varían entre 300 y 1 000 km. La proximidad de estas órbitas a la Tierra hace que estas órbitas se denominen «órbitas terrestres bajas» (LEO).

Las órbitas polares son órbitas circulares que tienen inclinaciones cercanas a los 90°. Estas órbitas se utilizan para misiones de investigación espacial que requieren una cobertura de todos los puntos de la superficie de la Tierra. Las comunicaciones directas entre un satélite en órbita polar y una estación terrena situada en las regiones polares se pueden lograr en cada órbita del satélite.

Las órbitas heliosíncronas requieren que el plano orbital del satélite se mantenga aproximadamente fijo en relación con el Sol. Estas inclinaciones orbitales son normalmente cercanas a los 98°. Estas órbitas son especialmente adecuadas para observaciones solares, observaciones de la Tierra y ciertas misiones meteorológicas.

Las órbitas elípticas se caracterizan por tener un perigeo pequeño y un gran apogeo. Estas órbitas, en particular las órbitas muy elípticas, proporcionan una plataforma para obtener datos en una gama de altitudes altas y bajas, y resultan adecuadas para muchas misiones de supervisión científica. La característica fundamental de este tipo de órbitas es el elevado porcentaje de tiempo durante el cual un satélite es visible desde su red de estaciones terrenas. Sin embargo, la intensidad de la señal puede variar considerablemente al variar la distancia entre el satélite y la estación terrena.

La órbita de los satélites geoestacionarios (OSG) es un anillo único alrededor de la Tierra situado en el plano del Ecuador a una altura de 35 786 km. Los satélites en esta órbita tienen un periodo orbital que es igual al periodo de rotación de la Tierra. Por lo tanto, un satélite situado en esta órbita tiene una visión constante de casi un tercio de la Tierra y puede mantener contacto continuo con una estación terrena situada dentro del campo de visión del satélite. La OSG la utiliza el servicio de investigación espacial para ubicar satélites de retransmisión de datos (SRD) que permiten una comunicación permanente con vehículos espaciales situados en órbitas terrestres bajas.

La información relativa a la ubicación orbital de los SRD del servicio de investigación espacial se puede encontrar en las Recomendaciones UIT-R siguientes:

- Rec. UIT-R SA.1275 – *Ubicaciones orbitales de satélites de retransmisión de datos que han de protegerse de las emisiones de sistemas del servicio fijo que funcionan en la banda 2 200-2 290 MHz.*
- Rec. UIT-R SA.1276 – *Ubicaciones orbitales de los satélites de retransmisión de datos que se han de proteger contra las emisiones de sistemas del servicio fijo que funcionan en la banda 25,25-27,5 GHz.*

Las órbitas en forma de halo son órbitas alrededor de un punto de equilibrio entre dos cuerpos celestes. La órbita se sitúa en un plano normal al plano que contiene la línea de visión entre los dos cuerpos. Los puntos de Lagrange L1 y L2, situados cada uno aproximadamente a 1,5 millones de km a cada lado de la Tierra y en el eje Sol/Tierra, son ejemplos de puntos de equilibrio alrededor de los cuales se utilizan órbitas en forma de halo para las misiones de investigación espacial.

Las órbitas alrededor de la Luna y de los planetas son generalmente circulares y están diseñadas para facilitar los experimentos y las mediciones de observación necesarias para cumplir los objetivos de la misión. Las órbitas lunares se han utilizado como órbitas de encuentro para misiones tripuladas a la superficie de la Luna. Las órbitas planetarias también se utilizan como órbitas para satélites de retransmisión de datos alrededor de un cuerpo planetario. Muchas misiones requieren desplegar una sonda o un vehículo de superficie para descender a la superficie del planeta y adquirir datos sobre el medioambiente y el entorno inmediato. Limitados por el consumo de potencia, no pueden transmitir estos datos directamente a la Tierra al estar separados por distancias enormes, por lo que estos vehículos espaciales locales transmiten la información a un vehículo espacial en órbita que la retransmite hacia una estación receptora en la Tierra.

1.2.3 Tipos de misiones de investigación espacial

Las misiones que requieren la transferencia de carga o de personas, tales como Soyuz y Progress de la Agencia Espacial Rusa, el vehículo de transferencia automática (ATV) de la Agencia Espacial Europea y el vehículo de transferencia H-II (HTV) de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón, necesitan comunicaciones con una estación terrena, ya sea directamente o a través de los sistemas SRD, y con vehículos situados en la misma órbita para operaciones de encuentro/atraque. Los datos de telemando, teledida y seguimiento se transmiten por los enlaces de comunicaciones. Los vehículos tripulados tienen requisitos adicionales de audio y de vídeo.

Las misiones que vuelan en vehículos permanentemente en órbita, como la Estación Espacial Internacional, necesitan servicios de comunicaciones con vehículos situados en la misma órbita y en Tierra. De la misma forma que con los vehículos de transferencia, las plataformas en órbita permanente tienen requisitos de telemando, teledida y seguimiento y necesidades de audio y de vídeo adicionales, que se pueden lograr mediante enlaces directos con redes de estaciones terrenas o a través de enlaces indirectos mediante los sistemas SRD.

Las misiones de actividad extravehicular (EVA – *extra-vehicular activity*) consiste en una excursión fuera de la estación base, ya sea en órbita (paseo espacial) o en la superficie de un planeta. Los sistemas de comunicaciones utilizados para las EVA proporcionan audio y datos de baja velocidad entre el astronauta y la estación base. El hecho de que el sistema de comunicaciones tiene que estar integrado en el traje espacial limita de forma importante el tamaño físico y los requisitos de potencia de un sistema EVA. Las actividades normales realizadas durante una EVA incluyen la construcción, el mantenimiento y la reparación de satélites y de otros vehículos espaciales. La EVA normalmente se produce a menos de 100 m de un vehículo espacial en órbita. La EVA realizada a partir de estaciones base planetarias en la superficie de la Luna, de Marte o de otros cuerpos celestes requerirán operaciones a distancias de hasta decenas de kilómetros.

Las misiones de exploración lunar y planetaria realizan investigaciones científicas y de ingeniería mediante la utilización de vehículos espaciales en órbita, sondas o vehículos de superficie y estaciones base en la superficie del cuerpo celeste que sirven como centros de comunicación para exploraciones tripuladas y robóticas ampliadas. Las misiones de exploración lunar y planetaria necesitan comunicaciones hacia y desde la Tierra así como comunicaciones locales en la superficie planetaria.

Las misiones de interferometría espacial con línea de base muy larga (VLBI – *very long baseline interferometry*) permiten a los científicos lograr resoluciones angulares de las fuentes radioeléctricas observadas que no se puede lograr mediante otros métodos radioeléctricos u ópticos. La amplitud y fase de las señales radioeléctricas de origen recibidas en dos o más estaciones independientes VLBI se correlacionan para obtener información detallada sobre la estructura de origen y la posición. Las misiones de VLBI espacial utilizan por lo menos una estación espacial para lograr órdenes de magnitud de observación mayores que cualquier base situada en la Tierra. Los datos recogidos por las estaciones de VLBI espacial tienen que ser transmitidos a la estación terrena en tiempo real, utilizando velocidades de datos de hasta 8 Gbit/s. Para una traducción coherente de la frecuencia patrón basada en la Tierra a través de un radioenlace de transferencia de fase entre la Tierra y el espacio también se requiere un enlace de transferencia de fase Tierra-espacio. Este enlace de retorno sirve para calibrar los errores de fase introducidos en el enlace Tierra-espacio. El enlace espacio-Tierra puede ser exclusivo para esta operación de transferencia de fase o se puede utilizar simultáneamente para transferir datos procedentes del vehículo espacial.

Las misiones SRD proporcionan una comunicación permanente entre un vehículo espacial LEO y una única estación terrena y pueden soportar simultáneamente vehículos espaciales de múltiples usuarios con requisitos de velocidades de datos desde bajas hasta muy altas. Un sistema de 3 SRD con una separación angular de 120 grados pueden teóricamente proporcionar el 100% de cobertura para vehículos espaciales LEO. Factores tales como el coste, la selección de las ubicaciones orbitales de los SRD y la ubicación geográfica de las estaciones terrenas SRD, hacen que resulte difícil la realización de este tipo de constelación SRD ideal. En general, es probable que se despliegue una constelación integrada por 2 SRD y se prevea la pérdida de parte de la cobertura del vehículo espacial. El vehículo espacial LEO perderá la comunicación tanto con el SRD como con la estación terrena SRD cuando el vehículo espacial LEO se introduzca en la zona de sombra de la Tierra, denominada «zona de exclusión». Para vehículos espaciales situados en órbitas helípticas o que precisen grandes altitudes, la cobertura está además limitada por el margen angular en que se puede orientar

y apuntar la antena SRD. La Recomendación UIT-R SA.1018 proporciona más información sobre los componentes de las misiones SRD.

Las misiones al espacio lejano mejoran nuestro conocimiento del sistema solar y del espacio en general más allá de 2×10^6 km de la Tierra. Las distancias extremas caracterizan las misiones de espacio lejano, superando algunas misiones actuales los 17 000 millones de kilómetros entre el vehículo y la Tierra. Estas distancias extraordinarias obligan a la utilización de equipos de comunicaciones muy complejos y tecnologías y técnicas de codificación avanzadas para lograr enlaces de comunicación fiables.

1.3 Sistemas de investigación espacial

1.3.1 Segmento terreno

La ubicación de las estaciones terrenas depende de consideraciones políticas y económicas, así como de los requisitos de la propia misión de investigación espacial. Las estaciones terrenas forman parte de una red mundial de comunicaciones y de estaciones de seguimiento y funcionan junto con instalaciones de tratamiento y conmutación de datos y centros de control que forman la red de investigación espacial. La transmisión y el encaminamiento de los datos entre instalaciones de la red las proporcionan generalmente sistemas de comunicaciones terrenales y fijos por satélite.

Las antenas utilizadas por las estaciones terrenas de investigación espacial para vehículos cercanos a la Tierra son fundamentalmente reflectores parabólicos con diámetros que varían entre 6 y 30 m. Se utilizan también antenas Yagi, formaciones de antenas y haces en forma de abanico para soportar las operaciones de mantenimiento. Para determinar la forma y el tipo correspondientes de la antena de la estación terrena se consideran factores como requisitos de la misión, capacidades del vehículo espacial, características orbitales, frecuencias de operación y movilidad de las antenas. La anchura de haz de la antena tiene que ser la adecuada para tener en cuenta cualquier incertidumbre angular en el apuntamiento. La Recomendación UIT-R SA.1414 proporciona información detallada sobre las estaciones terrenas SRD y de sus antenas.

Las antenas de las estaciones terrenas de espacio lejano se caracterizan por su gran diámetro (35-70 m), por transmisores de alta potencia y por receptores extremadamente sensibles, todos necesarios para proporcionar comunicaciones fiables a través de las enormes distancias típicas de las misiones de espacio lejano. La ganancia máxima de una antena de estación terrena de espacio lejano está limitada por su tamaño y por la precisión con la cual la superficie de la antena se aproxima a un verdadero paraboloides. Factores tales como la precisión de fabricación, los efectos térmicos, la rigidez de las estructuras de soporte, la deformación de la superficie debido a la gravedad o al viento y la diversidad de ángulos de elevación afectan todos a la precisión de la superficie. El gran tamaño y el enorme coste asociados con la construcción de este tipo de antenas han obligado a la construcción de sólo unas pocas antenas en todo el mundo. El Anexo 1 a la Recomendación UIT-R SA.1014 proporciona características detalladas de las estaciones terrenas de espacio lejano. En el futuro, pueden utilizarse sistemas que funcionan alrededor de 283 THz para la comunicación en el espacio lejano, gracias a que su ganancia es mucho mayor y su apertura de haz más pequeña que las que pueden obtenerse utilizando antenas más pequeñas. En la Recomendación UIT-R SA.1742 se detallan las características técnicas y operativas de los sistemas previstos.

En la Recomendación UIT-R SA.509 se muestra un diagrama de radiación generalizado para una antena de estación terrena de investigación espacial. En la Recomendación UIT-R SA.1345 se pueden encontrar métodos para predecir los diagramas de radiación de grandes antenas, y en la Recomendación UIT-R SA.1811 figuran los diagramas que se han de utilizar para realizar el análisis de compatibilidad en las bandas de 32 GHz y 37 GHz.

La señal más pequeña que un receptor de investigación espacial puede detectar está limitada por el ruido ambiente generado en el receptor al que pueden contribuir fuentes externas. Para operaciones en el espacio lejano, la limitada potencia isotrópica radiada equivalente del transmisor del vehículo espacial combinada con grandes distancias de propagación da como resultado señales extremadamente débiles en la estación terrena receptora. Por lo tanto, el ruido en los receptores de la estación terrena tiene que mantenerse tan bajo como sea posible para permitir detectar señales muy débiles y para reducir los requisitos de potencia del transmisor del vehículo espacial. Para operaciones espaciales cerca de la Tierra, la potencia transmitida y la potencia

isótropa radiada equivalente se diseñan para cumplir los niveles de densidad de flujo de potencia (dfp) del RR de la UIT, lo que implica la necesidad de receptores de bajo ruido.

La principal contribución al ruido del sistema total la constituye el ruido de fondo visto por la antena. Este ruido depende de la frecuencia de funcionamiento, del ángulo de elevación de la antena, de las condiciones meteorológicas y de la radiación térmica del suelo en los lóbulos laterales y trasero de la antena. Por debajo de 1 GHz, el ruido celeste proveniente de las galaxias y de la actividad solar aumenta al disminuir la frecuencia. Por encima de 1 GHz el ruido galáctico es bajo y empieza a aumentar el ruido del cielo, debido fundamentalmente a la atmósfera terrestre. El ruido debido a la lluvia empieza a ser significativo alrededor de 4 GHz y aumenta con la frecuencia hasta un valor de 100 K ó más cerca de 15 GHz.

En los Cuadros que se presentan en el Anexo 1 a la Recomendación UIT-R SA.1414 se indican las temperaturas de ruido típicas de sistemas SRD y en la Recomendación UIT-R SA.1014 para los sistemas del SIE en el espacio lejano. En los Cuadros 1 y 2 siguientes se muestran las temperaturas de ruido de sistema típicas de los receptores de estaciones terrenas utilizados para soportar operaciones cerca de la Tierra y en el espacio lejano.

CUADRO 1

Temperaturas de ruido de receptor de estaciones terrenas típicas para misiones cerca de la Tierra

Gama de frecuencias		Temperatura de ruido (K)
~2	GHz	150
10-11	GHz	160
13-15	GHz	300
18-26	GHz	200
37-38	GHz	200

CUADRO 2

Temperaturas de ruido de receptor de estaciones terrenas típicas para misiones de espacio lejano

Frequency		Noise temperature (K)	G/T (dB/K)
2 290-2 300	MHz	16-21	51
8 400-8 450	MHz	23-27	60,4
12,75-13,25	GHz	25-29	62
31,8-32,3	GHz	52-61	66,4

La potencia y la estabilidad del transmisor de la estación terrena no presenta problemas técnicos serios. Las potencias de transmisión y las potencias isotrópicas radiadas equivalentes dependerán de algunos factores como la frecuencia de funcionamiento, el tamaño de la antena, las velocidades de datos y las características del sistema receptor del vehículo espacial.

Para operaciones cerca de la Tierra, se utilizan potencias isotrópicas radiadas equivalentes (p.i.r.e.) tan altas como 60 dBW para canales de comunicación con requisitos de velocidades de datos altas, operaciones inesperadas y misiones lunares. Para la mayoría de las misiones de espacio lejano, se precisan potencias isotrópicas radiadas equivalentes tan altas como 110 dBW. La p.i.r.e. de estaciones terrenas transmitidas hacia el horizonte está limitada por el Artículo 21 del RR de la UIT. Se requieren restricciones adicionales caso por caso para cumplir los requisitos y procedimientos de coordinación de las estaciones terrenas.

1.3.2 Segmento espacial

Los vehículos espaciales tienen limitaciones de tamaño, peso y potencia así como de disponibilidad de los componentes calificados para el espacio. Los sistemas de vehículos espaciales también necesitan funcionar eficazmente y con un alto grado de fiabilidad en el ambiente extremo y algunas veces hostil del espacio. Los fallos pueden ser desastrosos y generalmente no se pueden reparar. Aunque se han realizado avances significativos en las comunicaciones espaciales, siguen realizándose desarrollos de nuevos equipos calificados para el espacio para proporcionar sistemas de comunicaciones más eficaces y con mayor capacidad en bandas de frecuencias más altas, lo que necesitará muchos años para su realización.

El entorno LEO constituye una plataforma fundamental para la innovación y la investigación de las tecnologías de comunicaciones espaciales. Los prototipos vuelan en vehículos espaciales experimentales y se incorporan con frecuencia en los experimentos de comunicaciones y de seguimiento de misiones cerca de la Tierra y de espacio lejano para pruebas y evaluación. Los sistemas de comunicaciones y de seguimiento experimentales que han cumplido con éxito las normas de cualificación espacial se aprueban para su utilización en futuras misiones de investigación espacial. Los dos componentes fundamentales del sistema de comunicaciones del vehículo espacial son la antena y los receptores.

Se precisan antenas omnidireccionales en todas las misiones de investigación espacial, ya sea como antena primaria del vehículo espacial o para mantener contacto con el vehículo espacial con independencia de la altitud. Las antenas omnidireccionales tienen haces muy anchos que proporcionan coberturas angulares grandes y permanentes y reducen los requisitos de estabilización y de control de actitud del vehículo espacial. Algunas misiones utilizan la antena omnidireccional como la antena principal del vehículo espacial, mientras que otras misiones la utilizan únicamente para el lanzamiento, las operaciones de emergencia y como antena para transmitir datos de baja velocidad. La falta de directividad puede dar lugar a problemas severos de multitrayecto cuando el vehículo espacial LEO se comunica con una SRD mediante una antena omnidireccional. Los problemas de multitrayecto, que prácticamente no existen con antenas directivas, se suprimen en gran medida mediante la utilización de señales moduladas con código de ruido pseudoaleatorio.

En las misiones de investigación espacial también se utilizan antenas electrónicas con elementos controlados por fase para proporcionar una mayor ganancia de antena de la que se consigue mediante antenas omnidireccionales. Estas antenas tienen además la capacidad de orientar y apuntar electrónicamente el haz en una dirección deseada. Para muchos experimentos de investigación espacial se prefieren antenas orientables electrónicamente en lugar de antenas orientables mediante mecanismos, puesto que evitan la interrupción de los instrumentos científicos y de los sistemas de instrumentación a bordo que son sensibles a las operaciones inerciales. Los vehículos espaciales LEO utilizan tanto sistemas de antenas controlados por fase multipanel, que utilizan compensación de fase para apuntar el haz en la dirección deseada, como sistemas de antenas controlados por fase esféricos o hemisféricos, que utilizan la creación de conjuntos de elementos para apuntar mediante la conmutación de elementos.

Los SRD utilizan sistemas de antenas controlados por fase para proporcionar soporte de acceso múltiple a los vehículos espaciales LEO con requisitos de velocidades binarias medias o altas en la banda de 2 GHz. En el modo transmisión se forma un único haz de antena en el SRD que se apunta y orienta mediante desfases en cada uno de los elementos de transmisión. En el modo receptor, el SRD recibe múltiples señales del vehículo espacial LEO que las transmite a una estación terrena central en la que se demultiplexan y se encaminan al equipo formador de haz. En este punto se ponderan la fase y la amplitud de las señales y se

combinan linealmente para sintetizar un haz para cada vehículo espacial LEO. El apuntamiento del haz se logra calculando los valores ponderados para cada una de las señales de los elementos receptores del sistema desde el SRD.

Se precisan antenas orientables directivas de alta ganancia para vehículos espaciales mayores y más robustos con requisitos de velocidades binarias medias a altas y para vehículos espaciales que necesitan comunicarse a grandes distancias. Los SRD utilizan antenas de reflector parabólico para soportar tanto comunicaciones Tierra-espacio como espacio-espacio. Además de las limitaciones en tamaño y peso, las antenas de los vehículos espaciales también están limitadas por el control de actitud, la precisión y la capacidad de apuntar con una determinada exactitud. Las antenas tienen que mantener la precisión de su superficie dentro de las tolerancias de diseño a pesar de los gradientes de temperatura inducidos por la radiación solar. La mayoría de las antenas de vehículos espaciales tienen que proporcionar funciones simultáneas de recepción y de transmisión y, como en el caso de operaciones SRD, proporcionar comunicaciones en diferentes bandas de frecuencias, manteniendo un apuntamiento y un seguimiento precisos de la antena de un vehículo espacial LEO. Para lograr estas delicadas operaciones se utiliza un sistema de alimentación complejo y un sistema de orientación cardán. El sistema de alimentación está diseñado para optimizar la ganancia de la antena en toda la gama de operaciones esperada mientras que el sistema de orientación cardán que orienta mecánicamente la antena para que apunte en la dirección deseada. En los casos que precisen cálculos de interferencias y para los cuales no se disponga de diagramas de antenas direccionales de alta ganancia en el vehículo espacial, se puede utilizar para representar la envolvente de los lóbulos laterales de la antena el diagrama de radiación de referencia siguiente, adoptado en la Recomendación UIT-R S.672.

$$\begin{array}{ll}
 G(\varphi) = G_m - 3(\varphi/\varphi_0)^2 & \text{para } \varphi_0 \leq \varphi \leq 2,58 \varphi_0 \\
 G(\varphi) = G_m - 20 & \text{para } 2,58 \varphi_0 < \varphi \leq 6,32 \varphi_0 \\
 G(\varphi) = G_m - 25 \log(\varphi/\varphi_0) & \text{para } 6,32 \varphi_0 < \varphi \leq \varphi_1 \\
 G(\varphi) = 0 & \text{para } \varphi_1 < \varphi
 \end{array}$$

donde:

$G(\varphi)$: ganancia para el ángulo (φ) a partir del eje (dBi)

G_m : ganancia máxima en el lóbulo principal (dBi)

φ_0 : valor mitad de la anchura de haz a 3 dB = $0,5 \sqrt{27000/(10^{G_m/10})}$ grados

φ_1 : valor de (φ) cuando $G(\varphi)$ de la tercera ecuación es igual a 0 dBi = $\varphi_0 10^{G_m/25}$ grados.

Normalmente no se utilizan receptores de bajo ruido en los vehículos espaciales para reducir el tamaño y el peso de los sistemas de comunicaciones y de seguimiento. Para compensar la baja sensibilidad del receptor del vehículo espacial se utilizan potentes transmisores en la estación terrena. Puesto que la mayoría de las antenas de los vehículos espaciales ven el transmisor de la estación terrena con un ruido de fondo de 290 K (temperatura de la superficie de la Tierra) no son necesarios receptores con temperaturas de ruido mucho menores. Estos factores junto con el coste, la complejidad y la fiabilidad determinan la temperatura de ruido del receptor necesaria para un determinado vehículo espacial. En los Cuadros del Anexo 1 a la Recomendación UIT-R SA.1414 figuran las temperaturas de ruido de funcionamiento típicas de los receptores SRD, y para los receptores de aeronave del SIE en el espacio lejano en la Recomendación UIT-R SA.1014. En los Cuadros 3 y 4 siguientes se muestran temperaturas de ruido de funcionamiento típicas de los receptores de vehículos espaciales utilizados para misiones cercanas a la Tierra o para misiones en el espacio lejano.

CUADRO 3

**Temperaturas de ruido típicas de los receptores de vehículos espaciales
para misiones cercanas a la Tierra**

Gama de frecuencias		Temperatura de ruido del receptor (K)
100-500	MHz	700-900
500-1 000	MHz	600-700
1-10	GHz	600-800
10-20	GHz	800-1 200
> 20	GHz	1 200-1 500

CUADRO 4

**Temperaturas de ruido típicas de los receptores de vehículos
espaciales para misiones en el espacio lejano**

Frecuencia		Temperatura de ruido del receptor (K)
2 110-2 120	MHz	200
7 145-7 190	MHz	330
16,6-17,1	GHz	910
34,2-34,7	GHz	2 000

El desarrollo y la utilización de transmisores de estado sólido han demostrado que resultan inherentemente adecuados para muchas aplicaciones de la investigación espacial de banda ancha. Su pequeño tamaño, sus requisitos de baja tensión y el tratamiento de los problemas de transferencia de calor dan como resultado un peso total del transmisor significativamente inferior al de los tubos de vacío. Los tubos de vacío, tales como los tubos de ondas progresivas, todavía se utilizan para soportar misiones con requisitos de alta potencia y operaciones en bandas de frecuencias más altas. La potencia de transmisión está menos limitada por la tecnología del transmisor que por la potencia eléctrica que puede suministrar el vehículo espacial de espacio lejano.

Los límites de la densidad de flujo de potencia en la superficie de la Tierra que figuran en el RR de la UIT limitan las potencias de transmisión máximas del vehículo espacial y las potencias isotropas radiadas equivalentes en determinadas bandas. En estos casos las misiones de investigación espacial utilizan técnicas de modulación de espectro ensanchado para mantener las características del enlace y cumplir los límites de densidad de flujo de potencia acordados internacionalmente.

En los Cuadros del Anexo 1 a la Recomendación UIT-R SA.1414 se indican la gama de potencias de transmisión para sistemas SRD. Los vehículos espaciales de investigación espacial cercanos a la Tierra transmiten entre 2 y 10 W y los vehículos espaciales de espacio lejano transmiten entre 5 y 100 W.

En el futuro, se prevén sistemas que funcionarán a frecuencias superiores a 200 THz tanto para enlaces espacio a espacio cerca de la Tierra como para enlaces espacio-Tierra en el espacio lejano. Estos sistemas tienen la ventaja de disponer de antenas muy direccionales pero, en consecuencia, su puntería debe ser extremadamente precisa. El RR de la UIT no contempla estos sistemas, dado que la definición de onda radioeléctrica llega arbitrariamente hasta los 3 THz. No obstante, las Comisiones de Estudio del UIT-R están autorizadas a estudiar y formular Recomendaciones sobre su utilización.

CAPÍTULO 2

Funciones de comunicación y de seguimiento e implementaciones técnicas de los vehículos espaciales

Las tres funciones principales de los vehículos espaciales que se tratan a continuación, telemando, teledida y seguimiento son funciones del servicio de operaciones espaciales. Las misiones de investigación espacial utilizan sus bandas atribuidas para proporcionar funciones de operaciones espaciales así como la teledida de la misión dentro de un único sistema radioeléctrico. Esto permite una utilización más eficaz del espectro radioeléctrico y también implica requisitos menores para la potencia, tamaño y peso del vehículo espacial. Tras una breve introducción de las funciones se analiza la implementación de los sistemas de comunicaciones y seguimiento para la investigación espacial. En la Recomendación UIT-R SA.1014 se tratan más asuntos técnicos sobre el espacio lejano.

2.1 Funciones

2.1.1 Transmisiones de telemando

Las señales de telemando realizan el guiado y el control de un vehículo espacial, activan diversas funciones de la misión o modifican la operación de un vehículo espacial o de sus cargas útiles y dan cuenta de anomalías de funcionamiento. Para las operaciones de lanzamiento, la mayoría de las señales de telemando se registran y se envían mediante un secuenciador de abordaje. Las señales de telemando Tierra-espacio se transmiten para su ejecución en tiempo real o se pueden almacenar para un envío secuencial posterior. Las señales de telemando críticas se envían a menudo como telemandos en dos etapas; el primer telemando configura la operación que ha de realizarse y el segundo ejecuta la operación. Ambos telemandos de un conjunto de dos etapas tienen que recibirse con éxito para que la operación tenga lugar.

2.1.2 Transmisiones de teledida del vehículo espacial

El subsistema de teledida del vehículo espacial indica el estado de los sistemas del vehículo espacial y de sus cargas útiles y proporciona datos medidos en la instrumentación del vehículo espacial a una estación terrena determinada. Este sistema también indica el estado de la recepción y ejecución de las señales de telemando. Los datos de teledida se pueden almacenar para una transmisión posterior o pueden requerir una transmisión en tiempo real, como es el caso para operaciones de lanzamiento o inesperadas.

2.1.3 Transmisiones de teledida de la misión

El subsistema de teledida de la misión es responsable de la transmisión hacia la Tierra de los datos científicos y de ingeniería acumulados durante los experimentos, la observación activa y pasiva, así como de datos generados por el vehículo espacial y sus cargas útiles, como pueden ser sondas y módulos de aterrizaje. Para misiones tripuladas el subsistema de teledida también tiene que transmitir señales de audio y de vídeo.

2.1.4 Seguimiento

El seguimiento es un requisito básico de cualquier misión de investigación espacial. Además de proporcionar la información necesaria para determinar la ubicación y la velocidad del vehículo espacial, el seguimiento es también necesario para evaluar las características del lanzamiento y de la órbita, para correcciones de la trayectoria, para determinar la temporización precisa de maniobras críticas como el encendido de retrocohetes y para determinar los ángulos de visibilidad y de apuntamiento de la antena del vehículo espacial que precisan el propio vehículo y las estaciones terrenas.

2.1.5 Radiociencia

La radiociencia constituye un campo importante de la investigación espacial sobre las misiones al espacio lejano, utilizando como instrumentos científicos los sistemas de comunicaciones y de seguimiento del vehículo espacial. Al viajar las señales radioeléctricas hacia y desde el vehículo espacial por el espacio lejano, atraviesan una gran variedad de medios que pueden proporcionar mucha información sobre el espacio a través del cual se propagan mediante los efectos que estos medios producen en los diferentes parámetros de la señal. Las técnicas de la radiociencia también miden los efectos de las fuerzas que actúan sobre el vehículo espacial y que se manifiestan como efecto Doppler. Se utilizan los parámetros medidos como la amplitud, la fase, la frecuencia, el contenido espectral, la polarización y la velocidad de grupo para suministrar información para el estudio de los distintos fenómenos geofísicos. Estos fenómenos son: la atmósfera planetaria, los anillos planetarios, las superficies planetarias, la gravedad planetaria, y la investigación de aspectos de la teoría de la relatividad general y la física fundamental relacionados con la gravitación. Las mediciones de radiociencia se cuentan entre las más exigentes en términos de precisión, exactitud, estabilidad y técnicas de observación, lo que lleva a establecer a menudo nuevas normas de calidad y a mejorar las técnicas de comunicación en el espacio lejano que benefician a otros usuarios.

2.2 Implementación

2.2.1 Fiabilidad, requisitos de proporción de bits erróneos y márgenes de enlace

El subsistema de telemando tiene una importancia fundamental para la seguridad y el éxito de cualquier misión de investigación espacial y tiene que funcionar con un alto grado de fiabilidad ante cualquier condición de transmisión adversa, como puede ser un tiempo meteorológico desfavorable o interferencias radioeléctricas. Para las misiones de espacio lejano el tiempo de propagación que necesita una señal para recorrer las enormes distancias entre el vehículo espacial y las estaciones terrenas constituye una consideración adicional que afecta a la fiabilidad del enlace de telemando. Un retraso en la identificación o en la repetición de un telemando fallido puede suponer un desastre y un fallo costoso para toda la misión.

La necesidad de fiabilidad en los subsistemas de teledata y de seguimiento es generalmente inferior que la de los subsistemas de telemando puesto que los datos perdidos o los errores en los datos durante la transmisión se pueden corregir en transmisiones posteriores sin afectar de forma significativa la seguridad o el éxito de la misión. Sin embargo, durante acontecimientos críticos de la misión, la fiabilidad de los subsistemas de teledata y de seguimiento es tan crítica como la del enlace de telemando. Las misiones tripuladas requieren datos médicos vitales, canales de audio claros y sin interrupciones y unos requisitos mínimos de vídeo, dando lugar a consideraciones adicionales sobre la fiabilidad.

El requisito de fiabilidad para los enlaces de investigación espacial durante operaciones o acontecimientos críticos para la misión se ha especificado que sea del 99,99%, lo que ha dado lugar a los requisitos siguientes:

- Enlaces Tierra-espacio independientes de las condiciones meteorológicas.
- Niveles altos de potencia isotropa radiada equivalente de la estación terrena para compensar la baja ganancia de las antenas omnidireccionales utilizadas por muchos vehículos espaciales, en particular durante las fases de lanzamiento y de inyección en órbita y durante operaciones inesperadas.
- Proporción de bits erróneos (BER) inferior a 1×10^{-5} (inferior a 1×10^{-6} para telemandos SRD).
- Codificación de las señales de telemando para asegurar un rechazo suficiente a los telemandos erróneos debidos a ráfagas de errores, desvanecimientos o señales no deseadas.
- Una anchura de banda suficiente para proporcionar toda la información esencial.

Las limitaciones de masa y de potencia en el vehículo espacial y los tipos de antenas utilizados por los vehículos tienen repercusiones significativas en los sistemas de comunicaciones, de seguimiento y de teledata del vehículo espacial y por lo tanto en los márgenes de enlace del sistema. Las grandes distancias de transmisión son un factor adicional para las misiones de espacio lejano. Los márgenes de enlace para la

investigación espacial se encuentran normalmente entre 2 y 6 dB. La Recomendación UIT-R SA.2183 proporciona la metodología preferida para calcular las características de los enlaces en el servicio de investigación espacial. En la Recomendación UIT-R SA.1742 se encuentran los requisitos de enlace y los métodos de cálculo para las transmisiones en el espacio lejano a 283 THz. Estos mismos requisitos para los enlaces de investigación espacial espacio-espacio a 354 THz y 366 THz se encuentran en la Recomendación UIT-R SA.1805.

2.2.2 Requisitos de velocidad de datos y de anchura de banda

Entre los factores para determinar las anchuras de banda adecuadas son fundamentales los requisitos de la velocidad de datos de los diferentes canales de comunicación del vehículo espacial. Las velocidades de datos de telemetría de la misión dependen del tipo de misión de investigación espacial, de la complejidad del vehículo espacial, de la capacidad de almacenamiento de los datos y de la disponibilidad del vehículo espacial durante las horas de contacto con la estación terrena. Las misiones tripuladas precisan comunicaciones de audio y de vídeo para garantizar el éxito de la misión y la seguridad de los astronautas. Los enlaces de conexión SRD son enlaces compuestos mediante la multiplexación de los enlaces del vehículo espacial LEO cliente junto con los canales de telemetría y de medición de distancias SRD y la señal piloto.

La determinación de la distancia resulta crítica, tanto para operaciones próximas a la Tierra como en el espacio lejano, pero son más exigentes para misiones en el espacio lejano. La precisión en la determinación de la distancia resulta a menudo un factor importante a la hora de determinar la anchura de banda total de un enlace para estas misiones.

Cuando se precisan dos ó más vehículos espaciales para lograr los objetivos de una única misión, puede ocurrir a veces que se encuentre más de un vehículo espacial de la misión dentro del haz de la antena de la estación terrena común y que se precisen comunicaciones simultáneas. Este requisito de funcionamiento requiere una anchura de banda para la estación terrena suficientemente amplia para incluir varias señales provenientes de los vehículos espaciales.

Se puede encontrar más información detallada sobre los requisitos de anchura de banda de las misiones de investigación espacial en las Recomendaciones UIT-R siguientes:

- Rec. UIT-R SA.364, *Anchuras de banda y frecuencias preferidas para satélites de investigación espacial próximos a la Tierra, tripulados o no tripulados.*
- Rec. UIT-R SA.1015, *Requisitos de anchura de banda para la investigación del espacio lejano.*
- Rec. UIT-R SA.1019, *Bandas de frecuencias preferidas y sentidos de transmisión para los sistemas de satélites de retransmisión de datos.*
- Rec. UIT-R SA.1344, *Bandas de frecuencias y anchuras de banda preferidas para la transmisión de datos de interferometría espacial con línea de base muy larga.*

2.2.3 Relaciones entre ambos sentidos

La frecuencia de transmisión del vehículo espacial está a menudo relacionada de forma coherente con la frecuencia de la portadora que recibe de la estación terrena, o de un SRD en el caso de operaciones con satélites retransmisores. Esta relación de frecuencias se basa en un factor específico conocido como «relación entre ambos sentidos» que se aplica en el vehículo espacial.

$$Frecuencia_{transmitida} = Frecuencia_{recibida} \times Relación\ entre\ ambos\ sentidos$$

La relación entre ambos sentidos para la investigación espacial depende de la banda de frecuencias utilizada como se muestra en el Cuadro 5:

CUADRO 5

Relaciones entre ambos sentidos para la investigación espacial

Banda de frecuencias (GHz/GHz)	Relación entre ambos sentidos (Enlace descendente/ ascendente)
2/2	240/221
8/7	880/749
15/13	1 600/1 469
32/34	3 328/3 599 3 344/3 599 3 360/3 599

2.2.4 Multiplexación

El servicio de investigación espacial utiliza tanto multiplexación por división en el tiempo (MDT) como multiplexación por división de frecuencia (MDF). La MDT la utilizan las misiones de espacio lejano para reunir paquetes digitalizados de datos provenientes de los diferentes instrumentos a bordo del vehículo espacial en un único tren de datos. Este planteamiento facilita la transmisión de datos fuente de una forma normalizada y automatizada. Para operaciones SRD se utiliza la MDT para retransmitir señales de telemando a vehículos espaciales con acceso múltiple y proporcionar canales discretos entre las estaciones terrenas y los vehículos espaciales.

Las operaciones SRD también utilizan MDF. Los datos de telemando están condicionados y se añaden módulo-2 asincrónicamente al código de ruido pseudoaleatorio (PN) del canal de telemando (los vehículos espaciales LEO utilizan el código PN del canal de telemando para la adquisición de señal). Este código con los datos se utiliza entonces para modular con doble fase la portadora de FI y del canal de telemando. Si se precisa determinación de distancias, un código PN largo modula con dos fases la portadora de FI del canal de determinación de distancias. Este canal se combina entonces con el canal de telemando en cuadratura de fase RF. La salida de FI en el modulador cuadrifásico se ecualiza, se traslada en frecuencia, se amplifica y se conmuta al conjunto combinador de RF en el que se forma pasivamente una señal de enlace, compuesta y directa, mediante las señales de otros vehículos espaciales LEO y el canal de telemando directo SRD y con la información del tono piloto. Este enlace compuesto se encamina finalmente a la antena transmisora seleccionada para su transmisión al SRD. En el SRD, la señal recibida se convierte a frecuencia intermedia, se filtra y se demultiplexa. Las señales que se desean transmitir a diferentes vehículos espaciales LEO se convierten a la frecuencia adecuada, se amplifican y se transmiten por la antena correspondiente al vehículo espacial LEO. El canal de telemando directo SRD y el tono piloto se cambian de frecuencia y se envían al subsistema de operaciones espaciales SRD.

Las operaciones de retorno son similares a las operaciones del enlace directo salvo que el flujo de las señales está invertido. Las señales del vehículo espacial LEO se reciben en la antena SRD, se amplifican, se convierten a la frecuencia intermedia y se envían al conjunto procesador de retorno en el que son multiplexadas con las señales de otros vehículos espaciales LEO recibidas, con la telemada SRD y el tono piloto del enlace de retorno. Esta señal de enlace de retorno compuesta se cambia de frecuencia, se amplifica y se transmite a la Tierra mediante la antena del enlace de conexión SRD. Las señales provenientes de vehículos espaciales LEO con canales de retorno con velocidades de datos muy elevadas no se multiplexan con otras señales recibidas. Estas señales se encaminan a través de un procesador de retorno especial, en el que se cambia la frecuencia y se amplifican para formar una señal de enlace de retorno especial que se transmite a la estación terrena receptora.

2.2.5 Corrección de errores y codificación mediante ruido pseudoaleatorio

Las técnicas de codificación con corrección de errores se utilizan a menudo para mejorar la BER de los enlaces de comunicaciones de investigación espacial, pero, debido a que estas técnicas introducen redundancia en los mensajes antes de su transmisión, es preciso aumentar la anchura de banda de la señal.

Puesto que este tipo de codificación permite la corrección de los errores transmitidos, se puede reducir la potencia transmitida de la señal. Para vehículos espaciales limitados en potencia resulta adecuada la utilización de alguna codificación con corrección de errores para asegurar mayores márgenes al sistema.

Los códigos con corrección de errores se pueden utilizar para corregir errores de bits aislados o ráfagas de errores. Se tiene que lograr una solución de compromiso entre la eficacia en la corrección de errores para un determinado efecto de error y los costes y/o el tiempo necesario para su implementación física. El código de corrección de errores básico utilizado por el servicio de investigación espacial es un código de convolución transparente con una tasa $1/2$ y una longitud limitada a 7 que resulta muy adecuado para canales en los que predomina el ruido gaussiano. La codificación por convolución en el vehículo espacial y la decodificación secuencial en el terminal terreno mejora las prestaciones totales del sistema independientemente de la técnica de modulación. Se añade normalmente la codificación Reed Solomon (RS) para reducir la probabilidad de error más que para reducir la relación E_b/N_0 . Utilizado en muchas misiones de espacio lejano, el código RS es un código de corrección de ráfagas de errores muy potente que tiene una tasa de errores no detectados extremadamente baja. Este código se puede utilizar solo, y como tal proporciona una corrección directa excelente en un canal con ruido en ráfagas, o se puede concatenar con códigos de convolución, siendo el código de convolución el código interno y el código RS el código externo. Esta configuración también se puede utilizar con entrelazado de bits. El entrelazado situado entre el código RS (exterior) y el código de convolución (interior) elimina cualquier ráfaga que aparezca a la salida decodificada de convolución.

Un sistema de código de ruido pseudoaleatorio (PN) es un sistema integrado que puede proporcionar funciones simultáneas tales como la transferencia de datos y la determinación de distancias en una única forma de onda integrada que tiene aplicaciones en muchas misiones próximas a la Tierra y de espacio lejano. Un sistema de código PN proporciona inmunidad frente a las señales interferentes multitrayecto, incluso a altitudes muy bajas como las que existen durante la fase inicial de lanzamiento de una misión. El receptor de seguimiento de código PN rechaza fuentes de interferencia de banda estrecha y la interferencia y el ruido de banda ancha es rechazado cuando se demodula una señal de banda estrecha mediante el receptor de seguimiento de fase. Otra ventaja de los sistemas con códigos PN es que la modulación PN distribuye la potencia del transmisor en una anchura de banda mayor, manteniendo la densidad de flujo de potencia en la superficie de la Tierra en los niveles especificados por el RR del UIT o en niveles inferiores.

Los sistemas con códigos PN se utilizan para soportar comunicaciones SRD debido a su capacidad para permitir la identificación positiva y la multiplexación de un gran número de vehículos espaciales en un canal común. La coordinación de librerías de códigos PN permite la interoperabilidad entre agencias y evita interferencias mutuas. Para determinar librerías de códigos se utilizan dos tipos de códigos PN, códigos Gold (códigos cortos) y códigos de longitud máxima (códigos largos). Los códigos Gold son una clase de códigos que tienen bajas propiedades de correlación cruzada. Los códigos son cortos para permitir una adquisición rápida de la señal. Los códigos Gold se utilizan en el canal de telemando de enlace directo y para transmisiones de los vehículos espaciales que requieran un enlace de retorno no coherente. Los códigos de longitud máxima son considerablemente más largos que los códigos Gold y se utilizan para proporcionar una buena resolución de la ambigüedad en la precisión de la determinación de distancia.

Los códigos PN síncronos directos y de retorno proporcionan mediciones de distancia precisas (transposición coherente) comparando las fases relativas de los generadores de código PN transmisor y receptor en el terminal en Tierra. El sistema puede proporcionar compensación Doppler para enlaces SRD provenientes de la estación terrena hacia el vehículo espacial y de nuevo hacia la estación terrena. Esto asegura que cualquier contribución Doppler debida al movimiento del SRD no degradará ni modificará las prestaciones globales del sistema.

2.2.6 Técnicas de modulación

Aunque algunas misiones de investigación espacial todavía utilizan técnicas de modulación analógica y de modulación de frecuencia, se espera que el rápido crecimiento en la utilización de las técnicas de modulación de fase digital (PN) sustituya totalmente a los sistemas analógicos en el futuro. Las misiones en el espacio lejano con requisitos de velocidad binaria de la telemada inferiores a 4 kbit/s utilizan modulación de fase binaria de una subportadora en onda cuadrada para los datos de baja velocidad de telemada y la modulación de fase subsiguiente de una portadora. Un índice de modulación adecuado da lugar a una

portadora residual que se utiliza para realizar el seguimiento de la señal recibida. La utilización de esta técnica mantiene la potencia de los datos claramente fuera de la anchura de banda del bucle de seguimiento de la portadora del receptor, logra un diseño sencillo del vehículo espacial y proporciona fiabilidad y características óptimas del enlace de telecomunicaciones.

Los sistemas cercanos a la Tierra y SRD utilizan diferentes variantes de modulación de fase. Las misiones cercanas a la Tierra generalmente utilizan modulación por desplazamiento de fase bifásica (MDP-2) para un único canal de datos o modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (MDP-4) para dos canales independientes, y modulación por desplazamiento mínimo gaussiano (MDMG) o MDP-8 para transmisiones eficientes en cuanto al ancho de banda. Los sistemas SRD están demostrando ser los sistemas de comunicaciones preferidos para misiones cercanas a la Tierra, cuando se dispone de ellos. Los sistemas SRD utilizan ensanchamiento mediante ruido pseudoaleatorio además de modulación MDP-4 no equilibrada. Los sistemas que funcionan por encima de 200 THz suelen recurrir generalmente a técnicas de modulación de posición de impulso (MPI) que permiten la detección directa de la señal transmitida y eliminan la necesidad de receptores coherentes.

2.2.7 Adquisición

La adquisición es el establecimiento de un enlace de comunicaciones entre un vehículo espacial y una estación terrena que permite el flujo ininterrumpido de datos entre el vehículo espacial y la estación terrena. Para misiones en el espacio lejano, misiones SRD, misiones tripuladas cercanas a la Tierra y misiones que se realizan en tiempo real, la adquisición es un elemento clave en la secuencia de eventos durante la comunicación.

La mayoría de las comunicaciones de investigación espacial precisan operaciones coherentes para proporcionar importantes datos de seguimiento del vehículo espacial. Para estas operaciones se tiene que adquirir en primer lugar un enlace ascendente desde la estación terrena hacia el vehículo espacial antes de iniciar la adquisición del enlace descendente y la adquisición de datos subsiguiente entre el vehículo espacial y la estación terrena. Esto permite que la frecuencia de la portadora descendente del vehículo espacial y el código PN (distancia) se relacionen de forma coherente y se enganchen para recibir señales ascendentes desde la estación terrena. Las operaciones SRD tienen una complejidad adicional al tener que encaminar las señales ascendentes y descendentes a través del SRD.

Las operaciones no coherentes no precisan adquisición de la frecuencia ni código de la portadora ascendente antes de devolver el inicio de la señal. El vehículo espacial transmite en la dirección de una estación terrena una potencia isotrópica radiada equivalente compatible con su velocidad de datos. El conocimiento previo de la frecuencia del oscilador local del vehículo espacial permite a la estación terrena (o al SRD) buscar, adquirir y enganchar la señal entrante. El efecto Doppler en un sentido depende de la frecuencia recibida y de la tolerancia del oscilador local del vehículo espacial.

La duración de una secuencia de adquisición es normalmente corta, del orden de 5 a 10 s. Sin embargo, durante eventos de interferencia que pueden producir la pérdida de la señal o el desenganche de la portadora de la señal del bucle de seguimiento de portadora pueden pasar minutos antes de volver a adquirir la señal.

2.2.8 Técnicas de seguimiento

El seguimiento por radar se utiliza durante las operaciones de lanzamiento. Antes que depender de ecos débiles, muchos vehículos espaciales están diseñados para tener balizas o transpondedores para operaciones de seguimiento. La atenuación atmosférica limita normalmente las operaciones de seguimiento por radar a frecuencias inferiores a 6 GHz.

El seguimiento por medición de distancia o por medición de distancia-velocidad coherente y no coherente proporciona una precisión en el seguimiento que supera la que se logra mediante redes de radar basados en Tierra. La medición de distancias se determina midiendo el tiempo de ida y vuelta de una señal radioeléctrica entre una estación terrena y un vehículo espacial. La medición de la velocidad se determina midiendo el desplazamiento Doppler de la frecuencia de la señal. En operaciones no coherentes, el oscilador local del vehículo espacial genera y transmite una frecuencia de portadora de referencia conocida en la estación terrena receptora. Un extractor Doppler en la estación terrena compara la frecuencia recibida con la frecuencia de referencia generada localmente para determinar los desplazamientos Doppler.

Las operaciones coherentes proporcionan mediciones de la distancia y del Doppler en los dos sentidos. La estación terrena transmite la frecuencia portadora modulada mediante un código de distancia específico. El vehículo espacial recibe y engancha en fase la frecuencia recibida y genera una frecuencia de portadora transmitida coherente con la señal recibida. Esta frecuencia coherente está basada en una relación entre ambos sentidos definida por la administración o la red espacial. El vehículo espacial genera un código de determinación de distancia, síncrono con el código de determinación de distancia recibido, y lo utiliza para modular la frecuencia transmitida. La estación terrena recibe y engancha en fase la señal entrante y la compara con la frecuencia de referencia radiada inicialmente por la propia estación para determinar las mediciones de Doppler. Las mediciones de distancia se determinan en la estación terrena midiendo el tiempo transcurrido entre el instante de la transmisión de los elementos en el código de medición de distancia ascendente y el instante de la recepción de los mismos elementos en la estación.

La interferometría de muy larga línea de base (VLBI) se emplea principalmente para la investigación astronómica y geodésica. La VLBI da soporte a las misiones en el espacio lejano mediante la realización de marcos de referencia celestes y terrenales. El marco celestial se define mediante un catálogo de fuentes radioeléctricas extragalácticas, el marco terrenal se define mediante cuadros de coordenadas de estaciones y modelos geodésicos, y los cuadros de orientación de la Tierra (precesión, nutación, UT1, movimiento polar) relacionan estos dos marcos. La VLBI constituye un mecanismo para calcular los parámetros que definen los marcos de referencia mediante la medición exacta de la diferencia entre el tiempo de llegada de las señales de fuentes radioeléctricas extragalácticas recibidas en dos estaciones terrenas muy separadas. Por ejemplo, utilizando varias de estas mediciones, se pueden determinar las posiciones de las estaciones terrenas con una precisión relativa de 1 cm. Para desarrollar el marco de referencia VLBI se utilizan frecuencias próximas a 2, 8 y 32 GHz.

La precisión en la navegación del vehículo espacial depende del conocimiento preciso de los parámetros que definen el sistema de coordenadas de navegación. Por ejemplo, un error de 3 m en la supuesta ubicación de la estación terrena puede dar lugar a un error de 700 km en la posición calculada de un vehículo espacial situado en el planeta Saturno.

Además de para el marco de referencia, también se utiliza una técnica basada en VLBI, denominada distancia unidireccional diferencial (DOR) para medir directamente la posición angular del vehículo espacial. La medición de la posición angular es un complemento natural de la distancia de visibilidad directa y de la medición Doppler. Dos o más estaciones terrenas observan la señal del vehículo espacial y una fuente radioeléctrica extragaláctica de ángulo cercano, seleccionada del catálogo de cuerpos celestes de manera alternada. Midiendo con exactitud el retardo de cada fuente y conociendo los parámetros del marco de referencia, se puede determinar la posición angular del vehículo espacial respecto de los cuerpos celestes.

La determinación de distancias consiste en la transmisión de dos o más frecuencias para crear una señal con ancho de banda suficiente como para poder medir el retardo de grupo (es decir, un tono o una gama de tonos). Los tonos mayores y menores se encuentran en las gamas de los kHz a MHz. Se utilizan tonos laterales para la resolución de ambigüedades. En el espacio lejano se utilizan sistemas de determinación de distancia mediante pseudoruido con relojes en la gama de los MHz. La VLBI de la aeronave requiere una separación entre tonos que puede variar entre $1/5500$ y $1/400$ de la frecuencia de la portadora principal del vehículo espacial para poder obtener mediciones del retardo precisas. Para operaciones en la banda de 8 GHz se obtienen tonos entre 1,5 MHz y 20 MHz.

El sistema de transpondedores de determinación de distancia bilateral SRD (BRTS) proporciona una determinación precisa de los parámetros orbitales del SRD utilizando transpondedores fijos ubicados en diferentes zonas de la Tierra y en cada SRD. Este método de triangulación define las mediciones de distancia al SRD y la posición del SRD en relación con dos ubicaciones conocidas y proporciona datos de seguimiento para la determinación precisa de las efemérides de cada SRD en órbita.

CAPÍTULO 3

Consideraciones sobre las bandas de frecuencias para misiones de investigación espacial

Los factores que determinan las frecuencias específicas adecuadas para misiones de investigación espacial incluyen los requisitos de misión, la disponibilidad y coste de los equipos, los efectos de propagación y de radiación, las características de los enlaces y las atribuciones de frecuencias existentes. La evolución de los requisitos de misión y de los efectos físicos se utiliza para definir requisitos para nuevas atribuciones a la investigación espacial.

3.1 Consideraciones sobre la misión

Las misiones de investigación espacial requieren una diversidad de tipos de datos para soportar las funciones de telemando, teledata y seguimiento. Para misiones tripuladas se requieren señales de audio y de vídeo en tiempo real. Estos requisitos normalmente se multiplexan en una única portadora de frecuencia para conseguir una utilización eficaz del espectro.

Las atribuciones de frecuencia más elevadas normalmente proporcionan atribuciones de anchura de banda más ancha. Estas atribuciones proporcionan la capacidad de soportar velocidades de datos más altas, comunicaciones de vídeo y la utilización de esquemas de codificación más complejos para reducir eficazmente las tasas de error y la susceptibilidad a interferencias.

Se pueden reutilizar frecuencias si los vehículos espaciales tienen una separación angular suficientemente grande. Sin embargo, se requieren frecuencias diferentes para vehículos espaciales si sus características orbitales y sus requisitos de transmisión pueden dar lugar a interferencias.

El seguimiento preciso requiere que las frecuencias de las señales de seguimiento Tierra-espacio y espacio-Tierra estén relacionadas de forma coherente mediante una relación entre ambos sentidos adecuada. Este requisito se cumple siempre que la separación entre las frecuencias ascendente y descendente se encuentre entre el 6 y el 10% de la frecuencia más alta.

Las bandas de frecuencias para detección activa y pasiva dependen de la información que se busque en relación con las características del objeto, el entorno espacial o los fenómenos particulares del espacio que se están estudiando. Las bandas de frecuencias elegidas son aquellas identificadas por la Física como óptimas para la investigación científica. Las anchuras de banda determinan la resolución y la precisión que se puede obtener.

Las misiones de espacio lejano requieren comunicaciones a través de distancias extremadamente grandes, lo que da lugar a señales muy débiles en el receptor. La sensibilidad de los receptores de las misiones en el espacio lejano hace, por lo tanto, que sean muy susceptibles a la interferencia proveniente de emisiones no deseadas. Por ello, con el fin de evitar posibles interferencias, las frecuencias atribuidas a la investigación en el espacio lejano no deben atribuirse también a actividades de investigación espacial cerca de la Tierra. La excepción la constituyen misiones interplanetarias que tienen que funcionar en trayectorias que incluyen tanto distancias cercanas a la Tierra como del espacio lejano, tales como: misiones planetarias de exploración humana y misiones que tienen que traer muestras planetarias a la Tierra. Estas misiones se operan mejor en las atribuciones a la investigación espacial de 37 y 40 GHz.

3.2 Consideraciones sobre los equipos

Los factores de los equipos que dependen de la frecuencia influyen directamente en las características de los enlaces, como la ganancia de las antenas, el rendimiento o la precisión de apuntamiento o no afectan directamente a las características de los enlaces aunque, no obstante, precisan su consideración para la selección de las frecuencias. Para operaciones que transmiten y reciben simultáneamente mediante una única antena, se tienen que separar las bandas de frecuencias Tierra-espacio y espacio-Tierra entre un 6% y un 7%

de la frecuencia más alta para misiones cercanas a la Tierra y entre un 8% y un 20% de la frecuencia más alta para misiones en el espacio lejano.

El tamaño de la antena del vehículo espacial está limitado por consideraciones de espacio y de peso, el desarrollo tecnológico para grandes antenas desplegables y la capacidad del satélite para apuntar la antena con la precisión requerida. La gama de frecuencias entre 100 MHz y un 1 GHz es adecuada para vehículos espaciales con diagramas de antena amplios u omnidireccionales y requisitos de anchura de banda reducidos y para estaciones terrenas sencillas sin instalaciones de seguimiento. En la gama de frecuencias 1-10 GHz, las antenas de los vehículos espaciales tienen ganancias compatibles con los requisitos de estabilización de actitud y de orientación de los haces. La precisión de las superficies y del apuntamiento necesaria para estaciones terrenas grandes también se pueden cumplir en esta gama de frecuencias que resulta también adecuada para sistemas de seguimiento y comunicaciones de precisión y de banda ancha.

La disponibilidad de equipos con calificación espacial podría ser un factor que limita la utilización de frecuencias más altas. Actualmente, los equipos para la investigación espacial mejor desarrollados se han diseñado para las atribuciones en 2 GHz y 7/8 GHz, que son fundamentales para proporcionar enlaces tolerantes a las circunstancias meteorológicas. Estos equipos también resultan atractivos y disponibles inmediatamente para proyectos o misiones pequeños con requisitos de velocidades de datos reducidas y limitaciones presupuestarias. El equipamiento está llegando a su grado de madurez para las atribuciones de espacio lejano en 27/32/34 GHz que tienen la ventaja de disponer de anchuras de bandas algo más grandes para las aeronaves cerca de la Tierra y en el espacio lejano.

Las antenas de las estaciones terrenas de espacio lejano son normalmente grandes antenas parabólicas orientables, extremadamente caras y por lo tanto muy escasas. Por consiguiente, para las misiones en el espacio lejano sólo se dispone de un pequeño conjunto de grandes antenas de diámetro fijo.

3.3 Efectos de la propagación y de la radiación

Los enlaces de telecomunicaciones entre estaciones terrenas y satélites de investigación espacial tienen que atravesar la atmósfera de la Tierra en la que la absorción, las precipitaciones y la dispersión afectan a la propagación de las señales radioeléctricas y limitan la utilización de algunas bandas de frecuencias. Las precipitaciones, en particular la lluvia, producen la absorción y la dispersión de las ondas radioeléctricas lo que pueden dar lugar a grandes atenuaciones de las señales. Para cualquier intensidad de lluvia la atenuación específica aumenta rápidamente hasta una frecuencia de 100 GHz aproximadamente, por encima de la cual la atenuación no aumenta apreciablemente en función de la frecuencia. Para países situados en regiones con intensidades de lluvia elevadas, resulta crítica la elección de las frecuencias adecuadas si se tiene que mantener una alta calidad de las características a pesar de las condiciones meteorológicas adversas.

La absorción molecular se debe fundamentalmente al vapor de agua y al oxígeno atmosférico. Restos de gases, en ausencia de vapor de agua, también pueden contribuir de forma significativa a la atenuación para frecuencias superiores a unos 70 GHz. El vapor de agua tiene una raya de absorción centrada en 22,235 GHz, en 183,3 GHz y alrededor de 325 GHz. El oxígeno tiene una serie de rayas de absorción que se extienden entre 53,5 y 65,2 GHz y una raya aislada centrada en 118,74 GHz. En el futuro puede ser deseable utilizar estaciones retransmisoras geoestacionarias que funcionen en frecuencias que son relativamente opacas a la transmisión de señales radioeléctricas a través de la atmósfera terrestre, limitando así las interferencias entre las estaciones retransmisoras o los vehículos espaciales y las estaciones terrenales.

La temperatura de ruido del cielo que ve una antena de estación terrena depende de la frecuencia, del ángulo de elevación de la antena y de las condiciones atmosféricas. Por encima de unos 4 GHz las precipitaciones pueden dar lugar a un incremento en el ruido del cielo varias veces superior al de la temperatura de ruido del receptor. La temperatura de ruido del cielo vista por un vehículo espacial está determinada fundamentalmente por cuerpos celestes como los satélites y los planetas que determinan la limitación para la mayoría de las misiones de investigación espacial. El Sol con una temperatura de radiación de cuerpo negro de 6000 K, aumentará en gran medida la temperatura de ruido del sistema y por lo tanto se evitan normalmente las transmisiones que requieren que la antena receptora apunte hacia o cerca del Sol. Las temperaturas de radiación de cuerpo negro de la Luna y de los planetas varían entre 50 y 700 K (la Tierra tiene 290 K). Para muchas estaciones cercanas a la Tierra, la Tierra se encontrará normalmente dentro del lóbulo principal de la antena del vehículo espacial o del SRD y contribuirá a la temperatura de ruido total del

sistema receptor. La temperatura de ruido del sistema para vehículos espaciales típicos se sitúa entre 600 y 1 500 K.

Por debajo de 100 MHz, normalmente no se consideran frecuencias para la investigación espacial debido a que los efectos ionosféricos, el ruido cósmico y el ruido producido por la actividad humana impiden la utilización de frecuencias en esta banda. Entre 100 MHz y 1 GHz, la absorción atmosférica es baja y los factores meteorológicos afectan muy poco a la propagación de las señales. El ruido de fondo, sin embargo, es relativamente alto, aumentando en una relación $1/f^2$, y por lo tanto la utilización de receptores de bajo ruido no proporciona una mejora significativa de las características en esta gama de frecuencias. En la gama de frecuencias de 1 a 10 GHz, los efectos debidos a la atmósfera son muy pequeños en particular en el extremo inferior de la gama, lo que permite comunicaciones prácticamente independientes de las condiciones meteorológicas. El ruido galáctico y atmosférico son bajos, lo que permite la utilización de receptores de bajo ruido. Por encima de 10 GHz hasta 275 GHz, la propagación de las señales a través de la atmósfera está sometida a grandes atenuaciones debidas fundamentalmente a la absorción producida por las precipitaciones y los gases. Estos dos fenómenos pueden tener un efecto significativo en el sentido Tierra-espacio.

Debido a que las misiones en el espacio lejano operan a través de enormes distancias, la calibración de los efectos producidos por partículas cargadas en la velocidad de propagación requiere la utilización simultánea de frecuencias coherentes en dos o más bandas de frecuencias muy separadas. La navegación precisa depende de la determinación de la posición y de la velocidad del vehículo espacial mediante mediciones de fase y de retardo de grupo de las señales recibidas. La velocidad de propagación influye en estas mediciones y depende de la presencia de partículas cargadas a lo largo del trayecto de transmisión. El efecto de estas partículas varía inversamente con el cuadrado de la frecuencia y por lo tanto se prefieren frecuencias más altas para fines de navegación. La precisión necesaria para las mediciones de retardo de grupo requiere la utilización simultánea de enlaces en por lo menos dos bandas de frecuencias separadas, preferentemente frecuencias que difieran por lo menos en un factor de cuatro. El retardo de grupo entre los enlaces será diferente y esta diferencia se puede utilizar para definir una corrección adecuada del retardo en cada enlace.

Para sistemas que funcionan por encima de los 200 THz a través de un trayecto atmosférico, las consideraciones primarias son la dispersión, la refracción y la turbulencia atmosférica. Estos fenómenos pueden producir una atenuación general de la señal, reducir la coherencia del frente de ondas y/o modificar la dirección de la señal transmitida.

En la Serie P de Recomendaciones UIT-R sobre propagación de las ondas radioeléctricas se puede encontrar más información sobre los efectos de la propagación a través de la atmósfera terrestre sobre las ondas radioeléctricas y las señales por encima de 20 THz.

3.4 Consideraciones sobre las características de los enlaces

La fiabilidad de los enlaces es un requisito importante de la misión. Las operaciones críticas como operaciones de lanzamiento o emergencia, en las que no se puede garantizar la orientación del vehículo espacial, precisan enlaces muy fiables. La fiabilidad resulta de extraordinaria importancia en todas las misiones tripuladas. Las atribuciones a la investigación espacial en 2 GHz proporcionan un enlace fiable e independiente de las condiciones atmosféricas para misiones de investigación espacial y se utilizan para estas funciones críticas.

La identificación de bandas de frecuencias que proporcionen las mejores características para los enlaces de comunicación y de seguimiento de la investigación espacial depende de la consideración, en un análisis de las características de los enlaces, de los efectos de los parámetros de propagación que dependen de la frecuencia y de las características de los equipos. Un índice adecuado de la calidad de los enlaces lo constituye la relación entre la potencia de la señal recibida y la densidad espectral de la potencia de ruido (P_r/N_0). Las curvas derivadas de los análisis de balance de enlace ayudan a identificar las gamas de frecuencias que proporcionan las mejores características para las condiciones de misión propuestas. Diferentes hipótesis sobre la distancia de comunicación, las características de las antenas y la potencia del transmisor alteran los valores absolutos de la relación P_r/N_0 , pero no cambian la forma de las curvas. La banda de frecuencias que proporciona el valor más alto de la relación P_r/N_0 para un determinado sistema y un determinado conjunto de condiciones de propagación se define como la banda de frecuencias preferida.

3.5 Atribuciones al servicio de investigación espacial

Las atribuciones de bandas de frecuencias para la investigación espacial se iniciaron durante la Conferencia Administrativa de Radiocomunicaciones de 1959 en Ginebra en la que se establecieron atribuciones provisionales para transmisiones entre la Tierra y satélites artificiales de la Tierra en las bandas 136-137 MHz y 2 290-2 300 MHz. En 1963 la Conferencia Administrativa de Radiocomunicaciones Extraordinaria afianzó estas dos atribuciones a la investigación espacial poniéndolas a título primario, al mismo nivel que otros servicios, sólo en la Región 2 de la UIT. Desde entonces los avances en la tecnología y en las comunicaciones de la investigación espacial y la demanda para cumplir requisitos de datos siempre crecientes impusieron la atribución de bandas adicionales para satisfacer las necesidades crecientes del servicio de investigación espacial.

Las bandas de frecuencias preferidas para el servicio de investigación espacial se encuentran en las siguientes Recomendaciones e Informes UIT-R:

- Rec. UIT-R SA.363, *Sistemas de operaciones espaciales. Frecuencias, anchuras de banda y criterios de protección.*
- Rec. UIT-R SA.364, *Anchuras de banda y frecuencias preferidas para satélites de investigación espacial próximos a la Tierra, tripulados o no tripulados.*
- Rec. UIT-R SA.1019, *Bandas de frecuencias preferidas y sentidos de transmisión para los sistemas de satélites de retransmisión de datos.*
- Rec. UIT-R SA.1344, *Bandas de frecuencias y anchuras de banda preferidas para la transmisión de datos de interferometría espacial con línea de base muy larga.*
- Rec. UIT-R SA.1863, *Radiocomunicaciones de emergencia en vuelos espaciales tripulados.*
- Informe UIT-R SA.2177, *Selección de bandas de frecuencias en la gama 1-120 GHz para la investigación en el espacio lejano.*

En el Apéndice 2 figura un cuadro exhaustivo de las aplicaciones del SIE y sus correspondientes límites de dfp.

CAPÍTULO 4

Criterios de protección para la investigación espacial y consideraciones sobre la compartición de frecuencias

La compartición de frecuencias entre el servicio de investigación espacial y otros servicios es necesaria cuando se atribuyen bandas de frecuencias a múltiples servicios. Se pueden reducir las interferencias entre sistemas basándose en las condiciones de compartición establecidas como resultado de análisis realizados para ambos servicios. Los criterios de protección se definen para el servicio de investigación espacial con el fin de facilitar los análisis de interferencias cuando no se dispone de datos de los propios sistemas.

4.1 Consideraciones sobre las interferencias a la investigación espacial

Las interferencias producidas a las misiones de investigación espacial pueden implicar no sólo la reducción, la interrupción o la pérdida irremediable de datos, sino también la pérdida de la capacidad de dirigir y controlar el vehículo espacial. Esto se produce cuando se pierden señales de telemando durante fases críticas de la misión y cuando se interrumpen telemidas críticas en tiempo real. Las interferencias al canal de determinación de distancia pueden generar errores en la navegación del vehículo espacial. Las interferencias a los experimentos de radiociencia, incluso a niveles reducidos de ruido espectral, afecta a los datos científicos, dado que la interferencia altera la señal real que se está investigando. Si se detecta interferencia, normalmente se descartan los datos científicos afectados. O peor aún, si no se detecta la interferencia se utilizan datos científicos corruptos en los estudios como si estuvieran libres de interferencia.

Como todas las misiones de investigación espacial comparten el mismo conjunto de frecuencias radioeléctricas y de anchuras de banda atribuidas por la UIT, puede ocurrir que ciertas misiones estén sometidas a interferencias provenientes de otras misiones. La interferencia se puede producir cuando una estación terrena recibe una señal interferente proveniente de otro vehículo espacial de investigación espacial más cercano a la Tierra o cuando vehículos espaciales de diferentes misiones estén situados dentro de la anchura de haz de una estación terrena transmisora/receptora o en el sistema de retransmisión espacio-espacio. La dinámica orbital de la configuración de interferencia determina el periodo y nivel de la interferencia. Si uno o ambos vehículos espaciales están relativamente cerca de la estación terrena interferida, la duración de la interferencia puede ser relativamente breve. Sin embargo, en el caso en que ambos vehículos espaciales se encuentren relativamente lejos, como en misiones de espacio lejano, la interferencia puede producirse durante toda la transmisión.

El equipo más susceptible a las interferencias es el bucle de seguimiento de portadora y el preamplificador más utilizado por las misiones de espacio lejano y muchas de las misiones cerca de la Tierra. Se utilizan ampliamente bucles enganchados en fase en sistemas de comunicaciones de investigación espacial. Un receptor típico puede incluir varios bucles enganchados en fase sincronizados, cada uno diseñado para enganchar y seguir un determinado componente de la señal. La presencia de una señal interferente fuerte tiende a desenganchar uno o más bucles con la señal deseada dando como resultado una interrupción de las comunicaciones. Dicha interferencia también puede causar problemas considerables con los receptores que han de recuperar o regenerar las frecuencias portadoras a partir de las señales recibidas. La interferencia puede ser momentánea, producida por una señal interferente que barre la anchura de banda del bucle, o puede durar minutos. Cuando la interferencia causa la pérdida de enganche con la portadora, se precisan varios minutos para volver a adquirir y enganchar la señal deseada. Esta pérdida de enganche y el tiempo subsiguiente de adquisición de la señal deseada puede ser mucho mayor que la duración de la interferencia. La interferencia durante la adquisición de un pase en una misión cercana a la Tierra sobre una estación terrena puede dar lugar a la pérdida de una porción significativa del pase.

Una señal interferente fuerte puede hacer que el receptor se enganche a la señal interferente antes que a la señal deseada. Niveles de potencia débiles o moderados de la interferencia, ya sean fijos o variables, pueden producir un incremento en el error de fase estático y en la fluctuación de fase del bucle de seguimiento de la portadora.

La mayor susceptibilidad a la interferencia de un preamplificador máser se debe a señales fuertes cerca de la banda de paso del máser o de las frecuencias inactivas del máser. Las señales interferentes fuertes influyen en el funcionamiento de un máser saturando el preamplificador y llevando uno o más de sus componentes a una zona no lineal de funcionamiento. Esto produce una compresión de ganancia y la generación de armónicos, señales no deseadas y productos de intermodulación.

La posibilidad de interferencias perjudiciales debidas a emisiones no deseadas es un asunto que afecta a todos los servicios. Una forma de interferencia perjudicial que puede ser especialmente inquietante para los emisores espaciales son las emisiones no deseadas. Las emisiones no deseadas se deben a los armónicos de la señal generados por efectos de intermodulación del transmisor. Resultan especialmente problemáticas debido a que pueden afectar a grandes zonas del espectro y al hecho de que, normalmente, después del lanzamiento de un vehículo espacial, es imposible el ajuste o la modificación de un transmisor.

Una consecuencia de la utilización de receptores sensibles en los vehículos espaciales, especialmente los utilizados en el espacio lejano, es su susceptibilidad a cualquier tipo de interferencia generada dentro o fuera de las bandas atribuidas a la investigación espacial. Los emisores que utilizan una banda de frecuencias adyacentes a la banda atribuida a la investigación espacial pueden producir niveles de interferencia en la banda de investigación espacial que rebasan los criterios de protección. Puede recurrirse a bandas de guarda y al filtrado en los extremos de la banda de las señales transmitida y recibida para limitar las interferencias causadas por las emisiones fuera de banda. Sin embargo, no existen generalmente disposiciones en el RR de la UIT sobre bandas de guarda.

4.2 Criterios de protección para el servicio de investigación espacial

Los criterios de protección para la investigación espacial están bien documentados en las siguientes Recomendaciones UIT-R:

- Rec. UIT-R SA.363 – *Sistemas de operaciones espaciales. Frecuencias, anchuras de banda y criterios de protección.*
- Rec. UIT-R SA.609 – *Criterios de protección para los enlaces de telecomunicación con satélites de investigación espacial, tripulados o no tripulados, próximos a la Tierra.*
- Rec. UIT-R SA.1155 – *Criterios de protección relativos a la explotación de los sistemas de satélites de retransmisión de datos.*
- Rec. UIT-R SA.1157 – *Criterios de protección para la investigación del espacio lejano.*
- Rec. UIT-R SA.1396 – *Criterios de protección para el servicio de investigación espacial en las bandas 37-38 GHz y 40-40,5 GHz.*
- Rec. UIT-R SA.1743 – *Máxima degradación tolerable en los enlaces de radiocomunicaciones de los servicios de investigación espacial y de operaciones espaciales causada por la interferencia procedente de emisiones y radiaciones de otras fuentes.*

Estas Recomendaciones deben consultarse para cualquier estudio de interferencia o de compartición.

4.3 Consideraciones sobre la compartición para el servicio de investigación espacial

La compartición entre otros servicios y el servicio de investigación espacial resulta compleja por muchas razones. La razón principal es la naturaleza dinámica del entorno de interferencia. El movimiento relativo entre los vehículos espaciales y la superficie de la Tierra da lugar a factores que cambian constantemente, como son el acoplamiento entre antenas y los niveles de potencia recibidos. Los movimientos relativos y los cambios consiguientes en los enlaces de comunicación varían poco o mucho y pueden tener unas repercusiones importantes en el nivel, la duración y la probabilidad de la interferencia.

En segundo lugar, las características de los sistemas de comunicaciones próximos a la Tierra y de espacio lejano varían grandemente y dependen de algunos factores como los requisitos de la misión, las características orbitales, la complejidad de los vehículos espaciales y las limitaciones presupuestarias.

Para misiones próximas a la Tierra, la distribución y la concentración de emisores terrenales constituyen un factor importante en la consideración de interferencias y, dependiendo de la altitud y de las características orbitales del vehículo espacial, pueden tener un efecto muy pronunciado en el entorno de compartición. La

consecuencia de estas consideraciones es que la determinación de las interferencias y de la compartición que implica a las misiones de investigación espacial próximas a la Tierra se basan normalmente en análisis estadísticos que tienen en cuenta la dinámica del vehículo en movimiento. Para evaluar con precisión la capacidad de compartir las bandas de frecuencia con otros servicios, la comunidad dedicada al servicio de investigación utiliza hoy en día programas informáticos complejos capaces de manejar muchas variables y características de comunicación.

La Recomendación UIT-R SA.1016 trata las posibilidades de compartición de frecuencias entre estaciones de investigación del espacio lejano y estaciones de otros servicios.

Existen algunas Recomendaciones UIT-R que definen el caso de compartición cerca de 2 GHz. La Recomendación UIT-R SA.1273 establece los límites de densidad de flujo de potencia máxima en la banda 2200-2290 MHz generada en la superficie de la Tierra por emisiones provenientes de estaciones espaciales que funcionan en el sentido espacio-Tierra, incluidos los enlaces entre SRD y vehículos espaciales LEO. La Recomendación UIT-R SA.1274 recomienda un nivel de densidad de flujo de potencia de interferencia agregada para proteger los enlaces entre vehículos espaciales SRD y LEO. En la Recomendación UIT-R SA.1154 se incluyen disposiciones para la compartición de las bandas de 2 GHz de los enlaces entre los vehículos espaciales SRD y LEO y sistemas móviles. La Recomendación UIT-R F.1248 establece límites prácticos para la potencia isotropa radiada equivalente y la densidad espectral de potencia radiada por estaciones del servicio fijo en la dirección de un SRD, y la Recomendación UIT-R SA.1275 identifica ubicaciones orbitales SRD que deben ser protegidas en relación con misiones del servicio fijo en esta banda.

En la banda 25,25-27,5 GHz es poco probable que se produzcan interferencias provenientes de vehículos espaciales LEO de investigación espacial en satélites OSG del SFS puesto que las potencias isotropas radiadas equivalentes del vehículo espacial de investigación son significativamente menores que las de las estaciones terrenas transmisoras del SFS. Es posible la interferencia de las estaciones terrenas del SFS en satélites SRD. Puesto que un SRD sigue a un vehículo espacial, el acoplamiento entre el SRD y la antena de la estación terrena SFS puede dar lugar a interferencia perjudicial al receptor SRD. Aunque los haces de antena en esta frecuencia son relativamente estrechos, se pueden producir interferencias entre estaciones terrenas situadas en el borde de la Tierra visto desde un SRD, que pueden prolongarse durante un periodo relativamente largo de tiempo. La Recomendación UIT-R F.1249 establece límites prácticos de la potencia isotropa radiada equivalente y de la densidad espectral radiada por estaciones del servicio fijo en la dirección de un SRD. La Recomendación UIT-R SA.1276 identifica las ubicaciones orbitales SRD que precisan ser protegidas de interferencias.

La Recomendación UIT-R SA.1862 contiene directrices para la utilización eficiente de la banda 25,5-27,0 GHz, mientras que la Recomendación UIT-R SA.1626 trata de la viabilidad de la compartición en la banda 14,8-15,0 GHz. La Recomendación UIT-R SA.1810 especifica directrices para el funcionamiento de satélites de exploración de la Tierra en la banda 8 025-8 400 MHz, mientras que la Recomendación UIT-R SA.1629 trata de la compartición de enlaces de telemando en la banda 257-262 MHz.

4.3.1 Interferencias producidas por estaciones terrenas de investigación espacial

La interferencia producida por estaciones terrenas de investigación espacial en vehículos espaciales no OSG es una situación dinámica que depende de características que varían con el tiempo. Estas características incluyen el tiempo que un vehículo espacial interferido tarda en cruzar el haz de una antena de una estación terrena, las características de apuntamiento de la estación terrena transmisora mientras sigue y comunica con el vehículo espacial de investigación y, si el vehículo espacial interferido utiliza antenas directivas, las características de apuntamiento de la antena del vehículo espacial. Factores tales como la frecuencia de funcionamiento, el tipo de antena, su tamaño, su anchura de haz, etc., son consideraciones adicionales utilizadas para determinar la duración y el nivel de potencia de interferencia en un receptor del vehículo espacial interferido.

La interferencia producida por estaciones terrenas de investigación espacial en estaciones terrenales fijas y móviles están consideradas en disposiciones del RR de la UIT. El Artículo 9 del RR de la UIT define el procedimiento para realizar la coordinación u obtener el acuerdo con otras administraciones y el Artículo 21 del RR de la UIT trata de las bandas de frecuencias compartidas entre los servicios espaciales y terrenales por encima de 1 GHz. El Apéndice 7 del RR de la UIT proporciona el método para la determinación de la

zona de coordinación alrededor de una estación terrena en bandas de frecuencias entre 100 MHz y 105 GHz compartidas entre servicios de radiocomunicaciones espaciales y terrenales.

Una buena separación orbital en la OSG, anchuras de haz de antena estrechos y direcciones de apuntamiento adecuadas limitan cualquier interferencia entre los enlaces Tierra-espacio de los SRD y otros satélites OSG.

El Apéndice 8 del RR de la UIT indica el método de cálculo para determinar si se requiere coordinación entre redes de satélites geoestacionarios que comparten la misma banda de frecuencias. El Artículo 21 del RR de la UIT limita los niveles de potencia isotrópica radiada equivalente para estaciones terrenas, incluidas aquellas utilizadas por sistemas SRD, para proteger los sistemas fijos y móviles.

4.3.2 Interferencias producidas en vehículos espaciales de investigación espacial

Los vehículos espaciales de investigación espacial en órbita terrestre baja generalmente no reciben interferencias provenientes de satélites OSG de los servicios fijo o móvil por satélite debido a las menores distancias entre el vehículo espacial de investigación y su estación terrena, si se comparan con las distancias mucho mayores entre el vehículo espacial de investigación espacial y el satélite OSG, ya que la p.i.r.e. de las estaciones terrenas de investigación espacial es más elevada y las antenas utilizadas tienen mayor directividad. No obstante, existe la posibilidad de que dicho vehículo de investigación espacial reciba interferencia proveniente de sistemas de satélites no OSG en los servicios fijo o móvil. El vehículo espacial de investigación espacial que funciona en órbita terrestre media o alta que está más cerca de los satélites OSG puede no obstante recibir interferencia inaceptable causada por satélites de los servicios fijo o móvil. El número y la proximidad de los satélites transmisores pueden constituir una fuente de interferencia para los vehículos espaciales de investigación espacial.

En el caso de los vehículos espaciales de investigación espacial que funcionan más allá de la órbita geosíncrona o a distancias del espacio lejano, no cabe esperar interferencia causada por los satélites de los servicios fijo o móvil.

Las disposiciones de los Artículos 9 y 21 del RR de la UIT tratan de las interferencias provenientes de estaciones terrenas en un vehículo de investigación espacial. No existe la posibilidad de interferencias provenientes de sistemas del servicio fijo. Teniendo en cuenta la dinámica de la situación de interferencias, el despliegue de satélites del servicio fijo y las restricciones de apuntamiento aplicables a las estaciones terrenas transmisoras, el nivel de interferencia debería ser mínimo. El aumento en la utilización de sistemas del servicio fijo para aplicaciones punto a multipunto puede tener unas repercusiones significativas en la compartición con el servicio de investigación espacial.

4.3.3 Interferencias producidas por vehículos espaciales de investigación espacial

La interferencia producida a estaciones terrenales normalmente está limitada por el establecimiento de límites de densidad de flujo de potencia adecuados aplicables al vehículo espacial de investigación. Estos límites de densidad de flujo de potencia se definen en el Artículo 21 del RR de la UIT. En las bandas 137-138 MHz, 143,6-143,65 MHz y 400,15-401,0 MHz no existen límites de densidad de flujo de potencia. Los vehículos espaciales del servicio de investigación espacial transmiten utilizando antenas omnidireccionales hacia antenas de estaciones terrenas receptoras que son relativamente grandes y tienen una ganancia superior a la de las antenas utilizadas por los servicios fijo y móvil. La diferencia de ganancia de las respectivas antenas y la proximidad de las antenas transmisora y receptora de los servicios fijo y móvil entre ellas, reduce la probabilidad de interferencias que puedan producirse durante cualquier transmisión del servicio de investigación espacial, en particular en el limbo de la Tierra.

El nivel y la duración de cualquier interferencia hacia estaciones terrenas del servicio meteorológico por satélite se reduce de forma significativa mediante la utilización de grandes antenas, sus requisitos de seguimiento y la disposición espacial tanto de las estaciones terrenas de investigación espacial como del servicio meteorológico por satélite.

No se esperan interferencias, debido al acoplamiento de los lóbulos laterales de las antenas, provenientes de los enlaces espacio-Tierra SRD en enlaces de sistemas del servicio fijo por satélite (SFS) OSG (Tierra-espacio). Los satélites SFS-OSG situados en las antípodas de un SRD no experimentarán tampoco interferencia perjudicial debido a los factores de distancia y de acoplamiento entre antenas. Factores tales

como los haces de antena estrechos, el acoplamiento entre antenas, la proximidad de un satélite del servicio móvil con su estación terrena transmisora y la dinámica orbital de la situación de interferencias, darán lugar a una interferencia muy pequeña no perjudicial en los satélites móviles, proveniente de enlaces SRD espacio-Tierra.

La interferencia producida en estaciones terrenas del SFS por enlaces espacio-Tierra del SRD se limita mediante factores tales como una separación espacial adecuada, el acoplamiento de lóbulos laterales de las grandes antenas de estación terrena y la polarización. La coordinación, si es preciso, seguirá el método indicado en el Apéndice 8 del RR de la UIT. Las dinámicas asociadas con los requisitos de satélite móvil de las estaciones terrenas para vehículos espaciales de seguimiento LEO también limitará la interferencia proveniente de emisiones SRD espacio-Tierra.

4.3.4 Interferencias a estaciones terrenas de investigación espacial

La interferencia a estaciones terrenas de investigación espacial proveniente de operaciones del servicio móvil por satélite en la banda 137-138 MHz está sujeta a coordinación, de conformidad con el Artículo 9 del RR de la UIT. Por debajo de 1 GHz se puede utilizar un apantallamiento adecuadamente ubicado para proteger a las estaciones terrenas de investigación espacial y para reducir la necesidad de coordinación con emisores fijos y móviles. Por encima de 1 GHz, se aplica el Artículo 21 del RR de la UIT. El método para la determinación de la zona de coordinación alrededor de una estación terrena en bandas de frecuencia entre 100 MHz y 105 GHz, compartidas entre servicios de radiocomunicación espaciales y terrenales, se indica en el Apéndice 7 al RR de la UIT.

Las interferencias provenientes de satélites LEO del servicio móvil pueden ser importantes para los enlaces espacio-Tierra del SRD debido a su proximidad a la superficie de la Tierra, la densidad de sus sistemas y el número de sistemas que es probable que funcionen dentro de esa banda. La posibilidad de interferencia proveniente de estaciones fijas y móviles existe, si se superan los criterios de protección de las estaciones terrenas SRD que figuran en la Recomendación UIT-R SA.1155. En estos casos, puede ser necesaria la coordinación según se describe en el Apéndice 7 al RR de la UIT.

4.3.5 Límites de emisiones no deseadas especificados por la UIT

El UIT-R define emisiones no deseadas en dos regiones separadas. La región justo fuera del ancho de banda necesario es la región fuera de banda; la región aún más lejos es la región de emisiones no deseadas. En la Recomendación UIT-R SM.1539 se define la región límite. En general, el límite es el 250% del ancho de banda necesario, aunque existen algunas excepciones.

El número 3.8 del RR de la UIT estipula que, en relación con las emisiones fuera de banda, las estaciones transmisoras deberán, en la medida de lo posible, cumplir las condiciones de las Recomendaciones UIT-R más recientes. La máscara de emisiones fuera de banda para los servicios espaciales se define en el Anexo 5 a la Recomendación UIT-R SM.1541. Sin embargo, actualmente no se dispone de una máscara de emisiones fuera de banda de la UIT aplicables a los servicios espaciales que funcionan en enlaces espacio-espacio.

El número 3.7 del RR de la UIT estipula que las estaciones transmisoras se ajustarán a los niveles máximos de potencia admisibles para las emisiones no esenciales especificados en el Apéndice 3 del RR de la UIT. En el Cuadro II del Apéndice 3 del RR de la UIT se muestra que, para los servicios espaciales, la atenuación de cresta en la región de emisiones no deseadas es de $43 + 10 \log P$ ó 60 dBc, cualquiera sea el menos estricto. P se define como la potencia (en vatios) suministrada a la línea de transmisión de la antena.

APÉNDICE 1

Recomendaciones e Informes UIT-R relativas a la investigación espacial**Recommendations ITU-R**

- SA.363 Sistemas de operaciones espaciales. Frecuencias, anchuras de banda y criterios de protección
- SA.364 Anchuras de banda y frecuencias preferidas para satélites de investigación espacial próximos a la Tierra, tripulados o no tripulados
- SA.509 Diagrama de radiación de referencia de una antena de estación terrena de los servicios de investigación espacial y de radioastronomía, para uso en los cálculos de interferencia y en los procedimientos de coordinación
- SA.510 Posibilidad de compartición de frecuencias entre el servicio de investigación espacial y otros servicios en las bandas cercanas a 14 y 15 GHz – Interferencia de los sistemas de satélites de retransmisión de datos
- SA.609 Criterios de protección para los enlaces de telecomunicación con satélites de investigación espacial, tripulados o no tripulados, próximos a la Tierra
- SA.1014 Requisitos de telecomunicaciones para la investigación del espacio lejano con vuelos tripulados y no tripulados
- SA.1015 Requisitos de anchura de banda para la investigación del espacio lejano
- SA.1016 Consideraciones sobre la compartición en relación con la investigación del espacio lejano
- SA.1018 Sistema ficticio de referencia para los sistemas que comprenden satélites de retransmisión de datos en la órbita geoestacionaria y vehículos espaciales de usuario en órbitas bajas
- SA.1019 Bandas de frecuencias preferidas y sentidos de transmisión para los sistemas de satélites de retransmisión de datos
- SA.1154 Disposiciones para proteger los servicios de investigación espacial (IE), operaciones espaciales (OE) y explotación de la Tierra por satélite (ETS) y facilitar la compartición con el servicio móvil en las bandas 2 025-2 110 y 2 200-2 290 MHz
- SA.1155 Criterios de protección relativos a la explotación de los sistemas de satélites de retransmisión de datos
- SA.1156 Métodos de cálculo de las estadísticas de visibilidad de un satélite en órbita baja
- SA.1157 Criterios de protección para la investigación del espacio lejano
- SA.1274 Criterios para facilitar la compartición entre redes de satélite de retransmisión de datos y sistemas del servicio fijo en las bandas 2 025-2 110 MHz y 2 200-2 290 MHz
- SA.1275 Ubicaciones orbitales de satélites de retransmisión de datos que han de protegerse de las emisiones de sistemas del servicio fijo que funcionan en la banda 2 200-2 290 MHz
- SA.1276 Ubicaciones orbitales de los satélites de retransmisión de datos que se han de proteger contra las emisiones de sistemas del servicio fijo que funcionan en la banda 25,25-27,5 GHz
- SA.1344 Bandas de frecuencia y anchuras de banda preferidas para la transmisión de datos de interferometría espacial con línea de base muy larga

- SA.1345 Métodos para predecir los diagramas de radiación de antenas de gran tamaño utilizadas en los servicios de investigación espacial y de radioastronomía
- SA.1347 Fiabilidad de la compartición entre los receptores del servicio de radionavegación por satélite y los servicios de exploración de la Tierra por satélite (activo) y de investigación espacial (activo) en la banda 1 215-1 260 MHz
- SA.1396 Criterios de protección para el servicio de investigación espacial en las bandas 37-38 y 40-40,5 GHz
- SA.1414 Características de los sistemas de satélites de retransmisión de datos
- SA.1415 Compartición entre los sistemas del servicio entre satélites en la banda de frecuencias 25,25-27,5 GHz
- RS.1449 Viabilidad de la compartición entre el servicio fijo por satélite (SFS) (espacio-Tierra) y los servicios de exploración de la Tierra por satélite (pasivo) y de investigación espacial (pasivo) en la banda 18,6-18,8 GHz
- SA.1626 Viabilidad de la compartición entre el servicio de investigación especial (espacio-Tierra) y los servicios fijo y móvil en la banda 14,8-15,35 GHz
- SA.1629 Compartición entre enlaces de telemando en los servicios de investigación espacial y de operaciones espaciales con los servicios fijo, móvil y móvil por satélite en la banda de frecuencias 257-262 MHz
- SA.1742 Compartición entre enlaces de telemando en los servicios de investigación espacial y de operaciones espaciales con los servicios fijo, móvil y móvil por satélite en la banda de frecuencias 283 THz
- SA.1743 Máxima degradación tolerable en los enlaces de radiocomunicaciones de los servicios de investigación espacial y de operaciones espaciales causada por la interferencia procedente de emisiones y radiaciones de otras fuentes
- SA.1805 Características técnicas y operativas de los sistemas de telecomunicaciones espacio-espacio que funcionan en torno a 354 THz y 366 THz
- SA.1810 Directrices para el diseño de sistemas de satélites de exploración de la Tierra que funcionan en la banda 8 025-8 400 MHz
- SA.1811 Diagramas de referencia de antenas de gran apertura de estaciones terrenas del servicio de investigación espacial utilizados en los análisis de compatibilidad en que intervengan un gran número de fuentes de interferencia distribuidas en las bandas 31,8-32,3 GHz y 37,0-38,0 GHz
- SA.1862 Directrices para una utilización eficaz de la banda 25,5-27,0 GHz por los servicios de exploración de la Tierra por satélite (espacio-Tierra) y de investigación espacial (espacio-Tierra)
- SA.1863 Radiocomunicaciones de emergencia en vuelos espaciales tripulados
- SA.1882 Características técnicas y operacionales de sistemas del servicio de investigación especial (Tierra-espacio) para su utilización en la banda 22,55-23,15 GHz

Informes ITU-R

- SA.2065 Protección del enlace de telemetría para interferometría espacial con línea de base muy larga
- SA.2066 Métodos de cálculo de las estadísticas de visibilidad de un satélite en órbita baja
- SA.2067 Utilización de la banda de 13,75 a 14,0 GHz por el servicio de investigación espacial y el servicio fijo por satélite
- SA.2098 Modelos matemáticos de ganancia de antenas de estación terrena de gran apertura del servicio de investigación espacial para utilizar los análisis de compatibilidad en que interviene un gran número de fuentes de interferencia distribuidas
- SA.2132 Características y requisitos de telecomunicaciones para los sistemas espaciales VLBI
- SA.2162 Condiciones de compartición entre los enlaces de actividades extravehiculares (EVA) del servicio de investigación espacial y los enlaces de los servicios fijo y móvil en la banda 410-420 MHz
- SA.2166 Ejemplos de diagramas de radiación de antenas de gran tamaño utilizadas para la investigación espacial y la radioastronomía
- SA.2167 Factores que afectan a la selección de bandas de frecuencias para enlaces de telecomunicaciones del servicio de investigación espacial (espacio lejano) (espacio-Tierra)
- SA.2177 Selección de bandas de frecuencias en la gama 1-120 GHz para la investigación en el espacio lejano
- SA.2183 Método para calcular la calidad de funcionamiento del enlace en el servicio de investigación espacial
- SA.2190 Estudio sobre la compatibilidad entre el servicio móvil (aeronáutico) y el servicio de investigación espacial (espacio-Tierra) en la banda de frecuencias 37-38 GHz
- SA.2191 Requisitos de espectro para futuras misiones del servicio de investigación espacial (SIE) que funcionen en una potencial nueva atribución al SIE en la banda 22,55-23,15 GHz
- SA.2192 Compatibilidad entre el servicio de investigación espacial (Tierra-espacio) y los sistemas no OSG a no OSG del servicio entre satélites en la banda de frecuencias 22,55-23,55 GHz
- SA.2193 Compatibilidad entre el servicio de investigación espacial (Tierra-espacio) y los sistemas del servicio fijo, móvil y entre satélites en la banda 22,55-23,15 GHz

APÉNDICE 2

Cuadro de utilización del SEI y sus correspondientes límites de dfp

Frecuencia		Utilización SEI = no específico e-T = espacio-Tierra T-e = Tierra-espacio e-e = espacio-espacio elj = espacio lejano	Límite de la densidad de flujo de potencia para ángulos de incidencia (θ) por encima del plano horizontal (dBW/m ²) ⁽¹⁾			Ancho de banda de referencia
			$0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$	$5^\circ < \theta \leq 25^\circ$	$25^\circ < \theta \leq 90^\circ$	
2 501-2 502	kHz	SRS				
5 003-5 005	kHz	SRS				
10 003-10 005	kHz	SRS				
15 005-15 010	kHz	SRS				
18 052-18 068	kHz	SRS				
19 990-19 995	kHz	SRS				
25 005-25 010	kHz	SRS				
30,005-30,01	MHz	SRS				
39,986-40,02	MHz	SRS				
40,98-41,015	MHz	SRS				
137-138	MHz	s-E				
138-143,6	MHz	s-E				
143,6-143,65	MHz	s-E				
143,65-144	MHz	s-E				
400,15-401	MHz	s-E				
410-420	MHz	s-s				
1 215-1 300	MHz	Detección activa				
2 025-2 110	MHz	E-s, s-s	-154	$-154 + 0,5 (\theta - 5)$	-144	4 kHz
2 110-2 120	MHz	ds, E-s				
2 200-2 290	MHz	s-E, s-s	-154	$-154 + 0,5 (\theta - 5)$	-144	4 kHz
2 290-2 300	MHz	ds, s-E	-154	$-154 + 0,5 (\theta - 5)$	-144	4 kHz
3 100-3 300	MHz	Detección activa				
5 250-5 570	MHz	SRS				
5 650-5 670	MHz	Ds				
5 670-5 725	MHz	Ds	-152	$-152 + 0,5 (\theta - 5)$	-142	4 kHz
7 145-7 190	MHz	ds, E-s				
7 190-7 235	MHz	E-s				
8 400-8 450	MHz	ds, s-E	-150	$-150 + 0,5 (\theta - 5)$	-140	4 kHz
8 450-8 500	MHz	s-E	-150	$-150 + 0,5 (\theta - 5)$	-140	4 kHz
8 550-8 650	MHz	Detección activa				
9 300-9 800	MHz	Detección activa				
9 800-9 900	MHz	Detección activa				
12,75-13,25	GHz	ds, s-E				
13,25-13,4	GHz	Detección activa				
13,4-14,3	GHz	Detección activa				
14,4-14,47	GHz	s-E				
14,5-15,35	GHz	SRS				
16,6-17,1	GHz	ds, E-s				
17,2-17,3	GHz	Detección activa				

Frecuencia		Utilización SEI = no específico e-T = espacio-Tierra T-e = Tierra-espacio e-e = espacio-espacio elj = espacio lejano	Límite de la densidad de flujo de potencia para ángulos de incidencia (θ) por encima del plano horizontal (dBW/m ²) ⁽¹⁾			Ancho de banda de referencia
			$0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$	$5^\circ < \theta \leq 25^\circ$	$25^\circ < \theta \leq 90^\circ$	
22,55-23,55	GHz	s-s	-115	-115 + 0,5 ($\theta - 5$)	-105	1 MHz
22,55-23,15	GHz	E-s				
25,25-27,5	GHz	s-s	-115	-115 + 0,5 ($\theta - 5$)	-105	1 MHz
25,5-27	GHz	s-E	-115	-115 + 0,5 ($\theta - 5$)	-105	1 MHz
31-31,3	GHz	SRS	-115	-115 + 0,5 ($\theta - 5$)	-105	1 MHz
31,8-32,3	GHz	ds, s-E	-120	-120 + 0,75 ($\theta - 5$)	-105	1 MHz
34,2-34,7	GHz	ds, E-s				
34,7-35,2	GHz	SRS	-115	-115 + 0,5 ($\theta - 5$)	-105	1 MHz
35,5-36	GHz	active sensing				
37-38	GHz	s-E, NGSO	-120	-120 + 0,75 ($\theta - 5$)	-105	1 MHz
37-38 ⁽²⁾	GHz	ds, s-E, NGSO	-115	-115 + 0,5 ($\theta - 5$)	-105	1 MHz
37-38	GHz	s-E, GSO	-125	-125 + ($\theta - 5$)	-105	1 MHz
40-40,5	GHz	E-s				
65-66	GHz	SRS				
74-84	GHz	s-E				
94-94,1	GHz	active sensing				

⁽¹⁾ Las células en blanco significan que no se dispone del valor.

⁽²⁾ Según la nota **21.16.10** del RR de la UIT, este límite de dfp relajado se aplica al lanzamiento y a las fases operativas cerca de la Tierra de las misiones en el espacio lejano, que forman parte de los sistemas del SIE no geoestacionarios.

Unión Internacional de Telecomunicaciones
División de Ventas y Comercialización
Place des Nations
CH-1211 Ginebra 20
Suiza
Fax: +41 22 730 5194
Tel.: +41 22 730 6141
E-mail: sales@itu.int
Web: www.itu.int/publications

ISBN 978-92-61-15193-5 SAP id
3 9 4 3 3



9 789261 151935

Impreso en Suiza
Ginebra, 2015

Derechos de las fotografías: Shutterstock