

Unión Internacional de Telecomunicaciones

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R SA.363-5
(03/1994)

Sistemas de operaciones espaciales

Serie SA

Aplicaciones espaciales y meteorología



Unión
Internacional de
Telecomunicaciones

Prólogo

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

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

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

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

Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión sonora
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radio astronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
SNG	Periodismo electrónico por satélite
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
V	Vocabulario y cuestiones afines

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

Publicación electrónica
Ginebra, 2010

© UIT 2010

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

RECOMENDACIÓN UIT-R SA.363-5***

Sistemas de operaciones espaciales**Frecuencias, anchuras de banda y criterios de protección**

(1963-1974-1982-1986-1990-1994)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que las frecuencias técnicamente adecuadas para la telemida de mantenimiento, el seguimiento y el telemando de los satélites meteorológicos, de radionavegación, de telecomunicaciones, de exploración de la Tierra y de radiodifusión tanto si son prototipos como de explotación, están comprendidas en la gama de 100 MHz a 30 GHz (véase el Anexo 1);
- b) que las bandas de frecuencias preferidas para la telemida de mantenimiento, el seguimiento de precisión y el telemando se encuentran entre 1 y 8 GHz;
- c) que, excepcionalmente, las bandas de frecuencias superiores a unos 10 GHz son técnicamente adecuadas para utilizarlas con fines de telemida de mantenimiento, seguimiento y telemando durante la reentrada de satélites en la atmósfera de la Tierra (véase el Anexo 2);
- d) que la integración de los enlaces de seguimiento, telemida de mantenimiento y telemando en los sistemas de telecomunicaciones y de transmisión de datos podría ofrecer ventajas y, entre ellas, el uso racional del espectro, particularmente para la fase de puesta en operación de los satélites geoestacionarios;
- e) que la validez de este enfoque ha quedado demostrada en la explotación de ciertos sistemas en operación;
- f) que, no obstante, los factores relacionados con la seguridad del satélite requieren que las antenas presenten un diagrama de radiación de amplia cobertura a fin de mantener los enlaces en particular durante las fases de lanzamiento y de la órbita de transferencia o en caso de pérdida momentánea de la orientación, y que es difícil obtener una radiación de amplia cobertura en las frecuencias superiores a 8 GHz;
- g) que, en el caso de los satélites de radiodifusión, el Apéndice 30 del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) contiene disposiciones para el empleo de las bandas de 11,7-12,5 GHz en la Región 1 y de 11,7-12,2 GHz en la Región 3, por las que se asigna a las administraciones en esas Regiones radiocanales para la radiodifusión por satélite, pero que no se ha hecho ninguna asignación específica para la telemida de mantenimiento, el seguimiento y el telemando (aunque el Anexo 5 al Apéndice 30 del RR especifica las bandas de guarda en los bordes de ambas bandas), razón por la cual podría ser difícil utilizar también dichas bandas para la telemida de mantenimiento, el seguimiento, o el telemando. En el caso de la Región 2, el Apéndice 30 del RR establece que los sistemas de operaciones espaciales podrían utilizarse en las bandas de guarda asignadas de 12 MHz en cada extremo de las bandas 12,2-12,7 GHz e igualmente en el Apéndice 30A del RR en las bandas 17,3-17,8 GHz;

* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de las Comisiones de Estudio 4, 3, 8, 9, 10 y 11 de Radiocomunicaciones.

** La Comisión de Estudio 7 de Radiocomunicaciones efectuó modificaciones de redacción en esta Recomendación en 2003 de conformidad con la Resolución UIT-R 44.

- h) que, en la mayoría de los casos, las anchuras de banda necesarias para las operaciones espaciales se determinan mediante la transmisión de señales de medición de distancia, y normalmente se encuentran entre 200 kHz y 1 MHz, con métodos de modulación clásicos;
- j) que la p.i.r.e. de los transmisores de las estaciones espaciales es limitada y que, por consiguiente, las estaciones terrenas receptoras deben funcionar con la máxima sensibilidad;
- k) que la p.i.r.e. de los transmisores de las estaciones terrenas puede aumentarse, dentro de los límites del RR, para asegurar una relación de protección conveniente a la entrada de los receptores de las estaciones espaciales,

recomienda

- 1 que las bandas de frecuencias inferiores a 1 GHz son técnicamente adecuadas para algunos tipos de telediagnóstico de mantenimiento, seguimiento y telediagnóstico de los satélites prototipo y de explotación en órbita baja (por ejemplo, inferior a 2 000 km);
- 2 que las frecuencias para las transmisiones de telediagnóstico de mantenimiento, de seguimiento de alta precisión y de telediagnóstico se hallan comprendidas entre 1 y 8 GHz;
- 3 que, por excepción, se utilicen para la telediagnóstico de mantenimiento, el seguimiento y el telediagnóstico durante el retorno de los satélites a la atmósfera terrestre, las bandas de frecuencias superiores a unos 10 GHz (véase el Anexo 2);
- 4 que para los sistemas de satélites tales como los meteorológicos, de radionavegación, de telecomunicaciones, de exploración de la Tierra y de radiodifusión y teniendo debidamente en cuenta las necesidades de la fiabilidad y la utilización económica del espectro de frecuencias, así como la seguridad de los vehículos espaciales durante todas las fases de la explotación, se prefiera, siempre que sea posible, para la telediagnóstico de mantenimiento, el seguimiento y el telediagnóstico, el uso de frecuencias de las bandas de las misiones espaciales empleadas para la transmisión de datos o para las telecomunicaciones. Cuando ello no sea posible, deberían utilizarse frecuencias de las bandas atribuidas específicamente al servicio de operaciones espaciales;
- 5 que en la planificación de frecuencias para el servicio de radiodifusión por satélite y para los enlaces de conexión asociados se tengan en cuenta las necesidades específicas en materia de telediagnóstico de mantenimiento, seguimiento y telediagnóstico, especialmente cuando se trate de asignaciones que comparten la misma posición orbital;
- 6 que los criterios de protección para los receptores de las estaciones terrenas son los siguientes: en las frecuencias superiores a 1 GHz, la potencia total de interferencia en cualquier banda de 1 kHz de anchura no debe rebasar -184 dBW a la entrada del receptor durante más del 1% del tiempo al día; en las frecuencias inferiores a 1 GHz, este valor aumenta a razón de 20 dB por década de frecuencia decreciente;
- 7 que los criterios de protección para los receptores de vehículos espaciales son los siguientes: la relación «potencia de la señal/potencia total de interferencia en cualquier banda de 1 kHz de anchura» no debe descender por debajo de 20 dB durante más del 1% del tiempo al día;
- 8 que como estos criterios no bastan para garantizar la salvaguardia de los vehículos espaciales en ciertas fases críticas de corta duración, como los lanzamientos, las administraciones interesadas se concierten para garantizar la salvaguardia de los vehículos espaciales en las fases críticas de corta duración.

Anexo 1

Sistemas de operaciones espaciales

Frecuencias, anchuras de banda y criterios de protección

1 Introducción

El número 1.23 del RR define el servicio de operaciones espaciales como sigue:

«Servicio de radiocomunicación que concierne exclusivamente al funcionamiento de los vehículos espaciales, en particular al seguimiento espacial, la teledata espacial y el telemando espacial.

Estas funciones serán normalmente realizadas dentro del servicio en el que funcione la estación espacial.»

Para comprender el significado de la segunda frase de esta definición, es preciso tener presente que, en principio, la idea fue ejecutar las funciones de las operaciones espaciales únicamente en las bandas atribuidas a las misiones. Pero la experiencia ha demostrado que, en determinados casos, la atribución de bandas propias facilita las operaciones espaciales. Esto permite, en particular, utilizar un reducido número de estaciones para llevar a cabo las operaciones espaciales de satélites cuyas misiones son de la competencia de distintos servicios: investigación espacial, meteorología por satélite, exploración de la Tierra por satélite, servicios fijo y móvil por satélite, servicio de radiodifusión por satélite, etc.

Además, las bandas de frecuencias técnicamente apropiadas a las operaciones espaciales no siempre coinciden con las apropiadas a las misiones. Finalmente, los criterios de protección de los receptores de las operaciones espaciales y de los receptores de telecomunicación de la misión pueden ser distintos.

El presente Anexo estudia sucesivamente las funciones a realizar, las bandas de frecuencias preferidas, las anchuras de banda, los criterios de protección y diversos aspectos de la explotación de los sistemas de operaciones espaciales.

Todos los aspectos se tratan de forma que las conclusiones puedan aplicarse tanto si las funciones de las operaciones espaciales se realizan en una banda de frecuencias correspondiente a la misión del satélite, como si se realizan en una banda de frecuencias atribuida al servicio de operaciones espaciales.

Los enlaces de operaciones espaciales pueden establecerse, bien directamente entre los vehículos espaciales y las estaciones terrenas, bien mediante satélites de retransmisión de datos. En este Anexo sólo se tendrán en cuenta los enlaces directos. En lo relativo a los satélites de retransmisión de datos, véanse las Recomendaciones UIT-R SA.1018 y UIT-R SA.1414.

2 Funciones de operaciones espaciales

Las principales funciones de operaciones espaciales son:

- la teledata de mantenimiento,
- el telemando,
- el seguimiento,
- la detección RF para el control de orientación.

2.1 Telemetria de mantenimiento

Para proceder al mantenimiento de un vehículo espacial, es necesario transmitir a Tierra un gran número de datos de mediciones, la mayor parte de los cuales son de velocidad reducida, como es el caso de:

- las mediciones de temperatura, bien sea con fines de supervisión o de control o para corregir las medidas de los instrumentos de a bordo en función de su temperatura;
- las mediciones de intensidad del campo magnético, para dar indicaciones relativas a la orientación instantánea del vehículo espacial o a su velocidad de rotación;
- las mediciones de desplazamientos: indicadores de separación de cuerpos, topes de seguridad para órganos desplegados;
- las mediciones de inercia (giróscopos, acelerómetros), cuyo conocimiento es útil para mantener la posición y orientación del satélite;
- las mediciones ópticas, para conocer la orientación del vehículo en relación con la Tierra, el Sol o las estrellas;
- las mediciones de presión en los depósitos y en las baterías electroquímicas;
- las mediciones de corrientes y de tensiones;
- la información sobre el estado de un componente o sobre la recepción o ejecución de una orden.

Todas estas mediciones permiten supervisar el estado en que se encuentran el vehículo espacial y su carga útil, estado que depende, de una parte, del medio ambiente exterior, de otra, de las órdenes de configuración que son transmitidas al vehículo por telemando o que provienen de un programador secuencial de a bordo de acuerdo con un programa preestablecido.

El conocimiento de estas informaciones permite lograr un funcionamiento correcto y sacar el máximo provecho de los recursos ofrecidos por el vehículo y su carga útil a los efectos de la misión, así como para analizar las situaciones imprevistas. Permite asimismo mejorar los conocimientos sobre las características de los materiales en órbita y el desarrollo de nuevos sistemas.

Las informaciones de telemetria pueden ser transmitidas en directo, o quedar almacenadas para transmisión ulterior.

2.2 Telemando

La mayor parte de los vehículos espaciales deben estar en condiciones de recibir órdenes por telemando. Los números 1.135 y 22.1 del RR hacen de ello una obligación en el caso de los satélites activos definidos en el número 1.180 del RR.

2.2.1 En el caso de los vehículos espaciales para misiones de corta duración, como son los lanzadores, la mayor parte de las órdenes pueden ser registradas antes del vuelo y distribuirse en el momento oportuno mediante un programador secuencial de a bordo.

No obstante, generalmente se utiliza el telemando espacial con fines de seguridad (por ejemplo, deteniendo la propulsión de un lanzador que se aparta de la trayectoria autorizada o destrucción del mismo, en caso necesario).

Determinadas funciones del telemando pueden llevarse a cabo también a través de un transponder de radar del servicio de radiolocalización.

2.2.2 En la mayoría de los otros casos, el telemando permite modificar el funcionamiento del vehículo espacial y de su carga útil:

- ya sea según las fases sucesivas de utilización en el curso de la misión,
- ya sea según las diferentes fases de vuelo (inserción en órbita, periodos de eclipse, etc.),
- o bien en función de situaciones anormales como las anomalías de funcionamiento.

Las órdenes transmitidas al vehículo espacial, en condiciones de visibilidad directa desde una estación terrena, pueden ser ejecutadas inmediatamente o bien registrarse en una memoria de la que se extraen posteriormente para su ejecución en instante también registrado en la memoria.

El telemando diferido reviste especial importancia cuando la misión del vehículo espacial es lo suficientemente compleja exigiendo equipar al vehículo de un computador. En este caso, el volumen de información a transmitir puede llegar al megabit en pocos minutos. Generalmente, la recepción correcta de señales de telemando se comprueba por el envío del acuse de recepción a través de la telemedida.

2.3 Seguimiento

El seguimiento espacial, que consiste en determinar la trayectoria, la velocidad o la posición instantánea de un objeto en el espacio valiéndose de las propiedades de la propagación de las ondas radioeléctricas (véanse los números 1.136 y 1.9 del RR) es una función que debe llevarse a cabo ineludiblemente en toda misión espacial, para satisfacer una o varias de las necesidades siguientes.

2.3.1 Sistema de control orbital del vehículo espacial

En términos generales, éste es uno de los métodos que permiten controlar la órbita de un vehículo espacial mediante medios de telemando y sistemas de propulsión a bordo. En la práctica, puede utilizarse:

- para la puesta en órbita de espera o de transferencia,
- para la modificación de las órbitas: por ejemplo, para pasar de una órbita de transferencia a la órbita de los satélites geoestacionarios,
- para la corrección fina de las órbitas: por ejemplo, para el mantenimiento en posición de un satélite geoestacionario y para las maniobras de encuentro,
- para el retorno a la Tierra de un vehículo recuperable.

2.3.2 Supervisión, seguridad, recuperación

La supervisión y la seguridad se refieren a las medidas anticolidión entre vehículos espaciales situados en órbitas vecinas, así como la predicción del impacto o del punto de aterrizaje de las fases de los lanzadores de retorno y de los vehículos espaciales.

2.3.3 Precisión orbital

Se trata de evaluar la precisión de los lanzamientos o de otras maniobras orbitales.

2.3.4 Atribución de los datos de localización a las misiones de medición y de observación

Se trata de poder relacionar las mediciones con la posición en que se encuentra el vehículo espacial en el momento en que se hacen tales mediciones. Esto es especialmente necesario cuando el vehículo espacial efectúa mediciones científicas relativas al medio en que se halla, como es el caso de las mediciones de intensidad del campo magnético, densidad de partículas, etc. Esto resulta imprescindible también en las misiones de observación de la Tierra, independientemente de los medios ofrecidos en el marco de estas misiones por la identificación de puntos de control en las imágenes transmitidas.

2.3.5 Publicación de efemérides

Es preciso hacer previsiones de visibilidad y de dirección de puntería hacia el vehículo espacial, para organizar el trabajo de las estaciones terrenas y para asegurar la puntería de instrumentos directivos: antenas de alta ganancia, telescopios, etc.

2.3.6 Observaciones

De la enumeración hecha se ha excluido, a sabiendas, las funciones de seguimiento que son el objetivo principal de las misiones espaciales como la geodesia espacial y la radionavegación por satélite.

Ciertas funciones de seguimiento espacial, principalmente algunas de las citadas en los § 2.3.1, 2.3.2 y 2.3.3 pueden llevarse a cabo en el marco del servicio de radiolocalización utilizando o no una radiobaliza de radar a bordo del vehículo espacial.

3 Bandas de frecuencias preferidas

Desde el punto de vista técnico, la gama de frecuencias en que se pueden realizar las funciones propias de las operaciones espaciales descritas en el párrafo anterior, se extiende, aproximadamente, de 100 MHz a 30 GHz.

En el caso especial de las comunicaciones necesarias durante el regreso de un vehículo espacial a la atmósfera terrestre, deben elegirse frecuencias superiores o iguales a 10 GHz (véase el Anexo 2). En los otros casos, la elección de las frecuencias depende principalmente, desde el punto de vista técnico, de los factores que figuran a continuación.

3.1 Límite inferior

El límite inferior de las frecuencias utilizables en las de operaciones espaciales es función de la influencia de la propagación radioeléctrica, a través de la ionosfera, en la precisión de las mediciones de seguimiento.

3.1.1 Efectos de la ionosfera en la precisión del seguimiento

La Recomendación UIT-R P.531 estipula los datos de propagación ionosférica y los métodos de predicción requeridos para el diseño de sistemas de satélites.

El error en las mediciones de distancia efectuadas mediante mediciones del retardo de grupo tiene un valor típico de 400 m para un trayecto vertical cuando la medición se efectúa a la frecuencia de 100 MHz. Para elevaciones muy bajas, el valor debe multiplicarse por 3 aproximadamente. No obstante, los valores encontrados en la realidad son muy variables y pueden ser hasta 10 veces menores o mayores. En la práctica es imposible corregir estos errores mediante la aplicación de modelos, a causa de la gran variabilidad espacial y temporal de la ionosfera. Para reducir el error ionosférico es preciso utilizar frecuencias suficientemente altas, ya que el error obedece a la ley de $1/f^2$. (Puede utilizarse también un par de frecuencias.) A 1 GHz, por ejemplo, el error tipo en el caso de un trayecto vertical es de 4 m; para una elevación muy baja el error tipo es de 12 m.

Lo que acaba de decirse en lo relativo a las mediciones de distancia fundadas en la medición del retardo de grupo, es válido también para las fundadas en la medición del retardo de fase, aunque en este caso el error es de signo contrario (acortamiento aparente en lugar de alargamiento aparente).

El error de dirección de puntería de una antena de seguimiento automático, de 30° de elevación, tiene un valor típico de 0,5 mrad a 100 MHz y pasa de 2,5 mrad en menos del 10% de los casos. Estos valores obedecen a una ley de $1/f^2$ y se dividen por 100 para una frecuencia de 1 GHz.

Las mediciones de la variación de la distancia y las interferométricas se ven afectadas por la ionosfera de modo similar a las mediciones de distancia y de ángulo. Además, sufren los efectos de la microestructura de la ionosfera, es decir, el efecto diferencial de la ionosfera en los dos recorridos cuya diferencia se mide. Pero estos efectos adicionales son, generalmente, inferiores a los principales; al igual que ellos, también disminuyen cuando se eleva la frecuencia.

3.1.2 Precisión necesaria en el seguimiento. Influencia en la elección de las frecuencias

La precisión necesaria de las mediciones de seguimiento depende de la ubicación geográfica de las misiones de los satélites. Depende también del número de estaciones terrenas que participan en el seguimiento, y de su disposición en la superficie de la Tierra y en relación con la órbita del satélite.

En gran número de misiones de aplicación, los satélites deben permanecer en una órbita determinada. Los dos casos más generales son el mantenimiento en posición de un satélite geoestacionario y el de un satélite de exploración de la Tierra en órbita heliosíncrona. En ambos casos, la precisión requerida, expresada en unidades de distancia, es del orden de 50 m, en la hipótesis de un reducido número de estaciones dispuestas convenientemente.

Puesto que la precisión global del sistema de medición no depende únicamente de la ionosfera sino también de otros factores, principalmente de la calidad del instrumento de medición, la parte correspondiente a la ionosfera debe ser inferior a 50 m. Por ende, esta condición comienza a cumplirse a partir del momento en que la frecuencia rebasa 1 GHz.

Cabe llegar a la conclusión de que la mayoría de las misiones de aplicación requieren, en lo que concierne a la precisión de seguimiento, la utilización de frecuencias superiores a 1 GHz. Esta conclusión se aplica también a ciertas misiones científicas. No obstante, otras misiones científicas (sobre astronomía, por ejemplo) y ciertas misiones de aplicación pueden admitir precisiones menores, y por consiguiente frecuencias inferiores a 1 GHz.

3.2 Límite superior

Aunque la gama de las frecuencias utilizables por las operaciones espaciales se extiende aproximadamente de 100 MHz a 30 GHz, la parte superior de esta gama es normalmente menos favorable a la hora de establecer o mantener el enlace en todas las fases de explotación de un sistema espacial. De hecho, es frecuente la exigencia de poder establecer en todo momento o mantener con carácter permanente (es decir, para cualquier actitud del satélite) los enlaces de teledirigida y de telemando. Por tal razón, gran número de satélites usan una cobertura de antena casi omnidireccional para las operaciones espaciales.

En el caso de los satélites de gran tamaño con estructuras complejas, tales antenas son a menudo difíciles de realizar para frecuencias superiores a 8 GHz. En las frecuencias más elevadas, la cobertura de la antena del satélite no será ya casi omnidireccional, sino que se limitará a ciertos ángulos. Ello puede conducir a una pérdida del contacto en RF con el satélite cuando los ángulos son desfavorables.

Además, a frecuencias superiores a 15 GHz, las condiciones de propagación en la atmósfera pueden producir un deterioro del enlace, a menos que se aumente considerablemente la potencia transmitida o la relación G/T de la estación receptora.

En estas condiciones, la ganancia de antena que se tendrá en cuenta al establecer los balances del enlace no es la ganancia en el lóbulo principal disminuida en 3 dB, como es corriente para las telecomunicaciones de misión. La ganancia que ha de tenerse en cuenta es la garantizada en los mínimos del diagrama de radiación dentro de la cobertura mínima requerida. La ganancia en los mínimos no depende únicamente del diseño de las antenas sino también de la distribución de las mismas y de las dimensiones y forma de la estructura del vehículo espacial y de sus apéndices, como por ejemplo pértigas, paneles solares, otras antenas, etc.

El efecto de máscara que ofrece el vehículo espacial puede disminuirse colocando la antena en el extremo de una pértiga de suficiente longitud. Puede preverse también un sistema automático en el vehículo espacial que, en caso de pérdida de la actitud nominal, garantice el funcionamiento del enlace con la estación terrena. Este enlace puede ser intermitente.

En la gama de 100 MHz a 30 GHz cabe distinguir 3 subgamas:

- la subgama inferior a 1 GHz:
el cuerpo del vehículo espacial afecta al diagrama de radiación, lo que puede ser una ventaja para los satélites de menores dimensiones (inferiores a 1 m) y un inconveniente para los satélites más grandes;
- la subgama de 1 a 8 GHz:
la radiación viene determinada principalmente por las características y disposición de las antenas;
- la subgama de 8 a 30 GHz:
la obtención de la radiación requerida trae consigo imposiciones más estrictas en cuanto al diseño y fabricación de las antenas del vehículo espacial.

Parece que la frecuencia más alta, utilizada hasta ahora para enlaces independientes, en cierta medida, de la orientación del vehículo espacial, es de 6425 MHz. No obstante, hay proyectos en marcha que prevén el uso de frecuencias tan altas como 14 GHz.

3.3 Otros factores que deben tenerse en cuenta para la elección de frecuencias

Para facilitar el desacoplamiento de los enlaces Tierra-espacio y espacio-Tierra, que permite utilizar una antena en ambos sentidos, es deseable que la relación de las frecuencias de los dos enlaces se sitúe entre 1,06 y 1,1.

Para optimizar el uso del espectro, es de desear que todos los sistemas espaciales que funcionan en estas bandas adopten la misma relación. Ello no es siempre posible, empero, particularmente en el caso de estaciones terrenas ubicadas en zonas atendidas por una red terrenal densa que funcione en la misma banda de frecuencias. En las bandas de 2 025-2 120 MHz y de 2 200-2 300 MHz, diversos sistemas espaciales ya en funcionamiento utilizan transpondedores coherentes con una relación de frecuencia 240/221 entre enlace descendente/enlace ascendente lo que permite medir la variación de distancia.

3.4 Resumen sobre las bandas de frecuencia preferidas

En resumen, las frecuencias preferidas para las operaciones espaciales se encuentran, aproximadamente, entre 1 y 8 GHz.

Pueden utilizarse frecuencias inferiores, en particular para los pequeños vehículos espaciales cuya misión no requiere una gran precisión de seguimiento.

Pueden ser preferibles frecuencias superiores para la realización de operaciones espaciales por los vehículos espaciales que utilicen estas frecuencias así como para los enlaces de una misión con la Tierra.

4 Anchura de banda necesaria

Desde el punto de vista de las necesidades de anchura de banda, cabe distinguir entre vehículos de lanzamiento y vehículos espaciales.

En el caso de los vehículos de lanzamiento, la anchura de banda del enlace espacio-Tierra guarda relación con la transmisión de numerosos parámetros que varían rápidamente, principalmente vibraciones y presiones.

En los otros casos, la anchura de banda del enlace espacio-Tierra viene generalmente determinada, no por la teledistancia sino por las señales de medición de distancia.

En lo que concierne al enlace Tierra-espacio, es también la transmisión de señales de medida de distancia a la que generalmente determina la anchura de banda necesaria.

En suma, las anchuras de banda necesarias son generalmente determinadas por la transmisión de señales de medición de distancias y son del orden de 200 kHz a 1 MHz tratándose de métodos clásicos de modulación. Las nuevas técnicas de modulación como la de espectro ensanchado, requerirán anchuras de banda de más de 1 MHz, pero permitirán una reutilización múltiple de la misma banda. Podrían ser suficientes unos valores inferiores si el seguimiento se llevara a cabo por interferometría o por medición de la variación de distancia (efecto Doppler medido en la frecuencia portadora).

5 Criterios de protección

5.1 Nivel de protección de los receptores de las estaciones terrenas

En general, se procura reducir al mínimo la potencia necesaria de los transmisores a bordo de los vehículos espaciales. Por consiguiente, es preciso que los receptores de las estaciones terrenas funcionen con el máximo de sensibilidad.

A más de 1 GHz, se considera que las estaciones terrenas tienen una temperatura total de ruido superior o igual a 100 K, lo que equivale a la entrada del receptor, a una densidad espectral de potencia de ruido de $kT \geq -208,6$ dB(W/Hz).

Se considera que en la mayoría de los casos es necesaria una protección de 5 dB, aproximadamente, en lo que respecta al conjunto de las interferencias de todo tipo.

La densidad espectral total de potencia de interferencia no debe, pues, ser superior a -214 dB(W/Hz) en la entrada del receptor.

A menos de 1 GHz, como consecuencia del aumento de la temperatura de ruido galáctico, puede aumentarse el nivel de interferencia admisible a razón de 20 dB por década de frecuencia decreciente.

5.2 Relación de protección de los receptores de las estaciones espaciales

En general, la potencia de los transmisores de las estaciones terrenas puede aumentarse con sujeción a los límites impuestos por el RR. Por consiguiente, los receptores a bordo de los satélites no siempre se explotan al máximo de su sensibilidad. En especial, para comunicar con satélites a baja altitud explotados cerca de las fuentes de interferencia de los servicios terrenales, puede mantenerse una potencia de emisión de las estaciones terrenas tan elevada como la utilizada por ejemplo, para los satélites geoestacionarios, con el fin de mantener una relación señal/interferencia suficiente.

Por consiguiente, la protección de los receptores de las estaciones espaciales se expresa mejor en términos de relaciones de protección que de niveles de protección.

En la mayor parte de los casos es suficiente una relación de protección señal/interferencia total de 20 dB.

5.3 Anchura de banda de referencia

La anchura de banda de referencia, en la que debe especificarse el nivel o la relación de protección, depende de las características de los receptores utilizados así como de su sensibilidad a interferencias de onda continua, con modulación de amplitud o modulación de fase con bajo índice de modulación. A menudo se utilizan receptores con enganche de fase; en este caso es la anchura de banda equivalente de ruido del bucle lo que caracteriza la reacción del receptor a una fuente interferente de banda estrecha. En los casos usuales, esta anchura de banda tiene un valor comprendido entre unas pocas centenas de hertzios y unos pocos kilohertzios. Puede adoptarse, por tanto, el valor de 1 kHz como anchura de banda de referencia.

5.4 Porcentaje de tiempo de referencia

Generalmente, el porcentaje del tiempo durante el cual los enlaces de operaciones espaciales pueden soportar un nivel de interferencia superior al nivel de protección puede establecerse en 1% cada día. Este valor supone que el vehículo espacial esté provisto de una capacidad de almacenamiento y de un automatismo que garanticen su correcto funcionamiento durante las interrupciones de las telecomunicaciones. Esta condición no siempre ha sido una realidad en el pasado, pero se considera que sería razonable contar con ella en los sistemas futuros.

No obstante, no puede tolerarse una interferencia que dure 15 min consecutivos en el curso de ciertas fases críticas previsibles, como son las de lanzamiento, de maniobras críticas del vehículo espacial, o cuando se trata de vehículos espaciales de corta vida, como son los cohetes sonda. Pero no sería razonable establecer los criterios de protección sobre la base de estas situaciones excepcionales. Es preferible invitar a las administraciones interesadas a efectuar un análisis específico de las interferencias que pueden producirse y a adoptar disposiciones para evitarlas, disposiciones que deberían tener carácter transitorio y ser aplicables tan sólo a ciertas regiones.

5.5 Conclusión sobre los criterios de protección

En lo que concierne a las estaciones terrenas que realizan funciones de operaciones espaciales y, funcionan a más de 1 GHz, la potencia total de interferencia en la entrada del receptor en toda la banda de 1 kHz de anchura no deberá exceder de -184 dBW durante más del 1% del tiempo cada día: por bajo de 1 GHz, este valor podrá aumentar a razón de 20 dB por década de frecuencia decreciente.

Respecto a las estaciones espaciales que realizan funciones de operaciones espaciales, la relación entre la potencia de la señal y la potencia total de interferencia en toda banda de 1 kHz de anchura no deberá ser inferior a 20 dB durante más del 1% del tiempo.

6 Aspectos operacionales

A continuación se establece una comparación entre las ventajas e inconvenientes de la utilización para las funciones de operaciones espaciales, de las bandas de frecuencias de misión, de bandas de frecuencias atribuidas al servicio de operaciones espaciales o de una combinación de ambas.

6.1 Utilización de las bandas de misiones de telecomunicaciones para operaciones espaciales

6.1.1 Ventajas

Puesto que la mayor parte de los vehículos espaciales están dotados de transmisores y receptores para las telecomunicaciones que les impone directamente su misión, es preferible, generalmente, usar estos mismos equipos para llevar a cabo la telemetría de mantenimiento, el telemando y el seguimiento, lo que reducirá el costo del material a bordo de aquéllos y en la estación terrena y economizará espectro.

6.1.2 Inconvenientes

Sin embargo, la experiencia ha venido a demostrar que esta forma de proceder no siempre es la mejor, ya que:

- cuando las telecomunicaciones espaciales utilizan frecuencias superiores a unos 7 GHz, es a menudo difícil obtener a bordo del vehículo espacial el diagrama de radiación necesario para asegurar la permanencia de los enlaces en la fase de lanzamiento y en las fases de pérdida de la orientación nominal;
- en ciertas bandas de frecuencias atribuidas a las telecomunicaciones espaciales, se han establecido planes de adjudicación que no dejan expresamente lugar para la transmisión de datos de operaciones espaciales;
- por otra parte, no se puede economizar tanto en el material de a bordo como parece a primera vista, cuando es preciso instalar un sistema de antena de amplia cobertura para las funciones de operaciones espaciales además del sistema de antenas de radiación directiva destinado generalmente a las telecomunicaciones de la misión;
- tampoco se puede garantizar necesariamente una economía en el material de la estación terrena ya que puede suceder que las funciones de las operaciones espaciales requieran una ubicación geográfica de las estaciones distintas que la de las funciones de la misión.

6.2 Utilización de bandas específicas del servicio de operaciones espaciales

6.2.1 Ventajas

Si se tienen en cuenta todos los costos a bordo y en tierra, puede ser más económico utilizar para las operaciones espaciales una red única de estaciones terrenas que atienda a satélites que efectúen misiones correspondientes a varios servicios a los que se hayan atribuido bandas de frecuencias diferentes. La red común deberá utilizar entonces frecuencias atribuidas específicamente al servicio de operaciones espaciales.

6.2.2 Inconvenientes

Una estación terrena polivalente que utilice frecuencias atribuidas al servicio de operaciones espaciales y dé servicio a diversos vehículos espaciales resultará menos atractiva si algunos de estos vehículos requieren enlaces de telemetría permanentes, ya que ello obligaría a multiplicar el número de estaciones terrenas. Se reduciría así la eficacia de utilización de las frecuencias y se aumentaría la posibilidad de interferencia, en particular en el caso de satélites geostacionarios.

6.3 Utilización combinada de las bandas de frecuencias de las misiones y de bandas específicas

En definitiva, la mejor solución, especialmente cuando las telecomunicaciones espaciales utilizan frecuencias superiores a 8 GHz, puede ser la de dotar a los vehículos espaciales de dos dispositivos de telemetría de mantenimiento, de telemando y de seguimiento, uno de los cuales funcione en la

banda atribuida a la misión y el otro en la banda de frecuencias más apropiada para las operaciones espaciales, es decir, la banda 1-8 GHz. El primer dispositivo se utilizará preferentemente en las fases de rutina y podrá activarse mediante las estaciones terrenas de telecomunicación o, eventualmente, mediante una estación terrena especializada; el segundo dispositivo se utilizará en la fase de lanzamiento y en las fases críticas, sin recargar excesivamente la estación terrena polivalente. El aumento de los costos del material de a bordo es menor que lo que puede parecer en principio, ya que el codificador de telemetría y el decodificador de telemetría no tienen que duplicarse, y, las antenas de a bordo tienen que duplicarse de todas las formas para asegurar la cobertura necesaria durante las fases críticas. En cuanto al aumento de los costes del material en tierra, habría que repartirlo entre los diferentes sistemas participantes. Como contrapartida al aumento de la inversión, esta solución ofrece la mayor seguridad y flexibilidad de funcionamiento en todas las fases de la misión sin que ello entrañe un sensible aumento en los gastos de funcionamiento.

Anexo 2

Influencia del plasma artificial en las comunicaciones con los vehículos espaciales

1 Introducción

La presencia de un plasma, por ejemplo, de aire ionizado, cerca de un vehículo espacial y de sus antenas, origina ciertas dificultades de telecomunicación. Existen plasmas naturales en las ionosferas de la Tierra y de otros planetas, pero se observa también un «plasma solar» en el espacio interplanetario, sobre todo en las cercanías del Sol. Los plasmas artificiales se deben principalmente a dos mecanismos:

- los «gases ionizados» generados por los sistemas de propulsión y de control de los vehículos espaciales, y
- la «envoltura de plasma» que se forma alrededor de un vehículo espacial que entra en la atmósfera de un planeta.

Deben considerarse dos efectos importantes del plasma, a saber:

- la influencia en el funcionamiento de las antenas, y
- la influencia en la propagación de las ondas radioeléctricas.

Este Anexo ofrece un compendio de los efectos del plasma artificial en las comunicaciones con los vehículos espaciales.

2 Resumen de los efectos del plasma durante el retorno a la atmósfera

La influencia del plasma en las telecomunicaciones en el momento del retorno a la atmósfera depende en gran parte de la naturaleza de la misión, que determina la trayectoria y la configuración del vehículo. En muchos casos se puede evitar o reducir al mínimo la atenuación de las señales en el momento del retorno, eligiendo bien la frecuencia de las señales, la ubicación de la antena y el tipo de ésta. Para esta elección hay que guiarse por el espesor del plasma, la frecuencia de las colisiones, la naturaleza del material de ablación y la naturaleza de los fenómenos de desequilibrio

(por ejemplo, los plasmas de tipo de producción o recombinación). También hay que tener en cuenta factores de orden práctico, como son la potencia necesaria, los métodos de modulación de las señales, las posibilidades de seguimiento de los vehículos espaciales por la estación y la ubicación con relación al vehículo espacial (ángulo de observación).

Algunos resultados experimentales hacen pensar que la frecuencia crítica de la envoltura de plasma puede a menudo alcanzar valores de hasta 1 y 10 GHz, e incluso mayores en algunos casos. La conclusión es que, desde el punto de vista técnico, se necesitan frecuencias iguales o superiores a 10 GHz para ciertas comunicaciones durante el retorno a la atmósfera, sobre todo si se trata de misiones lunares o planetarias.

En estas frecuencias, la absorción por la atmósfera planetaria puede ser muy grande. La Recomendación UIT-R P.676 contiene información pertinente sobre la atmósfera terrestre. También muestra que, por encima de 60 GHz, existen varias «ventanas» en las que la absorción por los gases atmosféricos puede ser suficientemente baja. Sin embargo, estos datos indican que la absorción que causan las precipitaciones troposféricas puede ser excesiva. A este respecto convendría utilizar frecuencias próximas a 90 GHz y quizá también a 140 GHz.

Otros programas experimentales han demostrado el constante progreso del conocimiento de la envoltura de plasma observada durante el retorno a la atmósfera. Los datos proporcionados por las mediciones efectuadas en vuelo a velocidades orbitales de retorno, mediante antenas experimentales y series de sondas electrostáticas inmersas, concuerdan perfectamente con la teoría, salvo en los extremos del periodo de atenuación del plasma. Las mediciones con sondas electrostáticas concuerdan, no sólo en lo que respecta a la densidad de cresta del plasma, sino también a su perfil.

Por otra parte, los efectos de la envoltura de plasma han sido atenuados modificando el propio plasma; por ejemplo, dando al vehículo espacial una forma aerodinámica (parte frontal puntiaguda) a fin de reducir el espesor del plasma, mediante la inyección de materias líquidas en el campo de afluencia, con lo que se restablecen las señales de radiofrecuencia que, de otra parte, quedarían oscurecidas por el plasma en el periodo de atenuación durante el retorno y mediante la elección de materias de ablación que puedan influir de modo significativo en la densidad de plasma. También se podría obrar sobre el sistema aplicando un campo magnético suficientemente intenso, y/o recurrir a una ventana de propagación por el, así llamado, modo de silbidos. Quizá pudieran combinarse estos distintos procedimientos para reducir los efectos de las envolturas de plasma.

3 Consideraciones sobre la influencia del plasma, producido por los gases de escape de los cohetes

El plasma debido a los escapes se produce siempre en la llama de los motores de los cohetes, pero también puede aparecer en otros sistemas de propulsión, por ejemplo, en los sistemas eléctricos. En su origen y debido a las condiciones límite distintas, este plasma no se parece al que se produce durante el retorno a la atmósfera.

Para poder describir un plasma debido al escape hay que conocer los factores característicos de la llama, por ejemplo, la composición del carburante y del oxidante, la relación de mezcla, las impurezas que contienen los metales alcalinos, las características de las toberas, las condiciones cinéticas termoquímicas, la dinámica de los gases del escape, etc. Conociendo estos factores y las condiciones atmosféricas ambientes, puede deducirse la estructura de la estela debida a los escapes. Ahora se conocen los cambios del flujo de gases debidos a la turbulencia inducida y pueden incluirse en los cálculos de la estructura de los escapes. Los problemas que plantea el empleo de escapes múltiples están todavía sin resolver y requieren mayor estudio.

Estudios teóricos y prácticos han permitido preparar métodos merced a los cuales puede preverse la influencia de los gases de escape. La configuración del plasma no es la de una envoltura que rodea al vehículo, por lo que plantea problemas distintos de los del retorno a la atmósfera. La densidad del plasma varía y no es probable que las antenas estén rodeadas de plasma; por consiguiente, pueden hallarse otros trayectos posibles de propagación (que no sean los que atraviesan las zonas más altamente ionizadas). Los efectos del plasma comprenden la absorción, refracción, difracción y modulación de amplitud y de fase. La pérdida total de la señal puede deberse a una combinación de estos efectos. La absorción depende de la concentración de electrones y de la frecuencia de las colisiones cuya distribución aproximada puede deducirse conociendo las características del motor. Puede producirse una difracción importante en un escape cuando la absorción es elevada. Habrá modulación parásita debida a la dispersión hacia adelante de la corriente turbulenta del reactor que incidirá en la antena. Las frecuencias con desplazamiento por efecto Doppler debidas a la variación de las velocidades turbulentas dentro del escape producen espectros relacionados con la estela. La comparación entre los aspectos obtenidos experimentalmente y los calculados ofrecen buenos resultados. El efecto del eco de radar (dispersión hacia atrás) se ha estudiado de modo semejante. Otro factor importante es el trayecto de propagación con relación a la dirección del escape; no siempre se puede despreciar la influencia de la refracción en el trayecto de la onda.

Por ejemplo, en el caso de un gran cohete que utilice combustibles químicos lanzado en el vacío, los gases de escape en la inmediata proximidad de la tobera forman un plasma a alta presión en el que la frecuencia de las colisiones de los electrones es aproximadamente $10^{11}/s$ y cuya densidad de electrones es de 10^{16} a 10^{17} por m^3 . Se trata, pues, de una región de amortiguamiento intenso con resonancias marcadas (frecuencias críticas). La expansión ulterior de los gases crea una zona intermedia entre la región en que predominan las colisiones y un estado exento de colisiones. La incomunicación radioeléctrica debida únicamente a los efectos de frecuencia crítica sólo es posible en las regiones de la estela en que la frecuencia de las colisiones es inferior a $10^8/s$. Debido a la expansión de los gases, una frecuencia de colisión de este orden va asociada necesariamente a una pequeña densidad de electrones ($10^{13}/m^3$), lo que quiere decir que es muy probable que las frecuencias radioeléctricas hasta 100 MHz, o incluso inferiores, atraviesen la llama entera. No obstante, la absorción total medida puede ser importante (de 10 a 30 dB), en razón únicamente de los largos trayectos que a través de la llama deben recorrerse en ciertas direcciones. Se han intentado comprobar experimentalmente las previsiones teóricas haciendo mediciones en tierra y en el instante del lanzamiento de cohetes.

Otros trabajos se han dirigido a mejorar las técnicas de previsión, en particular la dinámica de los fluidos, la representación de fluctuaciones turbulentas y el tratamiento de los procesos químicos que se producen dentro del escape. Se han mejorado los cálculos de la dinámica de los fluidos teniendo en cuenta la estructura de la onda de choque y una mejor descripción de los efectos del vuelo hacia adelante en la estela, incluido el tratamiento de la recirculación en la base. Ahora se dispone de métodos para determinar las magnitudes de esas turbulencias, es decir, la escala de longitud de turbulencia y la intensidad de la turbulencia, que se necesitan para describir la dispersión electromagnética producida por los gases de escape. En el cálculo de la estructura de la estela se incluye el efecto de reacciones químicas de velocidad finita, lo cual es particularmente importante para el cálculo de la densidad de electrones, ya que en ésta influye mucho la reacción química en altitudes bajas e intermedias. Se ha puesto especial interés en la esfera de los cohetes tácticos; no obstante, estos estudios complementan los relativos a los problemas de los escapes de vehículos espaciales y pueden estar directamente relacionados con situaciones que se encuentran en el vuelo espacial.
