

RECOMENDACIÓN UIT-R SA.1030

**REQUISITOS DE TELECOMUNICACIÓN DE LOS SISTEMAS
DE SATÉLITE PARA LA GEODESIA Y LA GEODINÁMICA**

(Cuestión UIT-R 143/7)

(1994)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que los sistemas de satélite para la geodesia y la geodinámica tienen requisitos de telecomunicación muy particulares;
- b) que estos requisitos afectan a las asignaciones y a otros asuntos reglamentarios,

recomienda

1. que se tengan en cuenta los requisitos y las características que se describen en el anexo 1 en relación con las asignaciones de frecuencias y otros asuntos reglamentarios concernientes a los sistemas de satélites para la geodesia y la geodinámica, y su interacción con otros servicios distintos del de exploración de la Tierra por satélite y del de investigación espacial.

ANEXO 1

**Requisitos de telecomunicación y características de los sistemas por satélite
para la geodesia y la geodinámica****1. Introducción**

La presente Recomendación trata de los sistemas por satélite en los que uno o más satélites están vinculados con estaciones terrenas y/o entre sí por medio de mediciones muy precisas de la distancia y de la variación de la distancia utilizando ondas radioeléctricas.

Existen otros sistemas por satélite que contribuyen al progreso de la geodesia y la geodinámica:

- la medición de distancias por láser de impulsos;
- las mediciones de interferometría con línea de base muy larga (VLBI) a través de sondas del espacio lejano y fuentes celestes (véanse las Recomendaciones sobre investigación del espacio lejano);
- la altimetría oceánica por radar a bordo de satélites (véanse las Recomendaciones sobre teledetección activa a bordo de un vehículo espacial);
- la radiometría en microondas para determinar la composición de la troposfera y aportar correcciones de los efectos de propagación a otras mediciones (véanse las Recomendaciones sobre teledetección pasiva a bordo de un vehículo espacial).

Estas diversas técnicas se utilizan a menudo conjuntamente, con diferentes equipos a bordo del mismo vehículo espacial y con estaciones terrenas coubicadas, es decir cercanas entre ellas y próximas a un punto geodésico de referencia.

2. Necesidades en materia de telecomunicación para las mediciones de la distancia y de la variación de la distancia

2.1 Consideraciones generales

Los sistemas de telecomunicaciones espaciales para la geodesia y la geodinámica deben cumplir en general tres funciones:

- determinación de la órbita con alta precisión,
- posicionamiento de puntos en la superficie de la Tierra con alta precisión, y
- distribución rápida de los resultados (preferentemente, esta función es realizada por el propio sistema).

Las funciones primera y segunda están estrechamente ligadas. Para el posicionamiento de puntos en un sistema de referencia geocéntrico es preciso que la órbita del satélite pueda predecirse o restituirse en el mismo sistema de referencia, con una precisión comparable a la que se precisa para el posicionamiento. En consecuencia, el sistema de determinación de la órbita utilizado para el seguimiento de satélites geodésicos debe tener una precisión mayor que la requerida normalmente para los satélites de aplicaciones. Ese género de sistemas de determinación de la órbita recurre típicamente a un número bastante grande de estaciones terrenas (por ejemplo, entre 10 y 50) distribuidas geográficamente de modo que se garantice el seguimiento continuo del satélite o satélites que deberán resultar siempre visibles desde dos o más estaciones. Esta red puede emplearse también para aplicaciones geodésicas, es decir, para la determinación de los parámetros de rotación de la Tierra, de las coordenadas geocéntricas de las estaciones y de las líneas de base que unen pares de estaciones.

La segunda función (ubicación precisa, absoluta y relativa, de un punto) se realiza generalmente con estaciones terrestres transportables con redes que se establecerán temporalmente en zonas de interés geográfico, algunas veces mediante agrupaciones de más de 20 estaciones dentro de una región limitada.

En lo que respecta a la tercera función, determinados parámetros geodésicos y de la órbita del satélite deben recuperarse en relativamente poco tiempo (aproximadamente un día). Quizá sea también preciso distribuir in situ datos reunidos localmente y datos de predicción orbital generados en una instalación central.

2.2 Telecomunicaciones de medición

La determinación de las posiciones relativas de las estaciones terrenas y los satélites o de su variación en función del movimiento de los vehículos espaciales puede basarse en la medición de:

- la distancia,
- la variación de la distancia,
- la diferencia de distancias (por ejemplo de dos satélites a una misma estación terrena),
- la variación de la diferencia de distancias,
- la distancia diferencial doble (por ejemplo de cada uno de dos satélites a cada una de dos estaciones terrenas),
- la variación de la distancia diferencial doble.

Otra clasificación posible de las telecomunicaciones de medición puede basarse en el número y el sentido de los enlaces:

- unidireccionales espacio-Tierra,
- unidireccionales Tierra-espacio,
- unidireccionales espacio-espacio (seguimiento satélite a satélite),
- bidireccionales entre estaciones terrenas y satélites,
- bidireccionales entre satélites.

2.3 *Transmisión de datos*

Los sistemas de medición enumerados más arriba facilitan sus resultados en uno de sus extremos. En caso de que esos datos no se extraigan en el punto en que se requieren a efectos del tratamiento ulterior o la difusión, es preciso transmitirlos al otro extremo del sistema. Además, el tratamiento de las mediciones brutas puede necesitar la adición de datos auxiliares disponibles en el otro extremo del enlace. Por ejemplo:

- datos sobre las condiciones de propagación medidas en las proximidades de las estaciones terrenas (presión atmosférica, temperatura, humedad) y añadidos a la señal del enlace ascendente;
- efemérides de los satélites, datos sobre el estado de la ionosfera, etc., que deben distribuirse a las estaciones terrenas.

Hay tres tipos de información que pueden transferirse por el sistema:

- señales de medición,
- resultados de medición,
- datos auxiliares.

Los dos últimos podrían multiplexarse con la señal de medición o utilizar enlaces distintos para la retransmisión.

3. **Bandas de frecuencias preferidas**

3.1 *Límites del espectro RF debidos a las características de propagación*

Las bandas de frecuencias utilizables están limitadas por las características de los medios por los que pasan las señales.

- La troposfera produce al mismo tiempo una atenuación por absorción y un retardo de las señales. Pese a que el retardo troposférico causa errores que rebasan los objetivos de precisión de la geodesia por satélite y que es preciso corregir en el proceso de obtención de los parámetros, no se trata de un criterio a efectos de la elección de frecuencias preferidas. La pérdida por absorción afecta considerablemente al presupuesto del enlace, sólo por encima de unos 20 GHz.
- La ionosfera produce una absorción despreciable por encima de unos 100 MHz. El límite inferior de las frecuencias utilizables viene determinado por el desplazamiento de fase y el retardo de grupo de las señales utilizadas para las mediciones.

Los errores de medición de distancia debidos a la ionosfera dependen del contenido electrónico total (CET), que varía en general con la latitud, la hora, la estación y la actividad solar en un intervalo tan grande como el comprendido entre $1,4 \times 10^{16}$ y 70×10^{16} electrones/m², e incluso superior en algunas regiones. La corrección directa mediante el modelo no es muy precisa debido a la gran variabilidad de la ionosfera.

Para reducir los errores de medida debidos a un conocimiento insuficiente de la ionosfera, es necesario utilizar frecuencias bastante elevadas o combinar los resultados de las mediciones efectuadas simultáneamente en cierto número de frecuencias coherentes.

En el cuadro 1 se indican el error bruto y el error residual corregido mediante la combinación de mediciones en dos frecuencias, para un valor medio de $CET = 20 \times 10^{16}$ el/m², y un trayecto vertical que atraviesa toda la ionosfera.

En el caso de un trayecto oblicuo, inclinado 30° con relación a la horizontal en el suelo, los valores del cuadro 1 se multiplicarán por 1,8. En los puntos por debajo de 20° a 400 MHz o por debajo de 10° a 2000 MHz, la curvatura diferencial de los rayos produce un aumento rápido de los errores residuales.

Como se advierte en el cuadro 1, la combinación de mediciones de 2 frecuencias reduce considerablemente el error de tipo ionosférico. Sin embargo, si en ese género de sistemas no hay una separación suficiente en el espectro radioeléctrico entre dichas frecuencias, los errores de tipo no ionosférico aumentan por un factor que es, por ejemplo, de entre 1,2 y 1,6 en el caso del par 150/400 MHz y que llega a ser de 3,4 en el caso del par 1 227/1 575 MHz.

Una conclusión importante que puede extraerse de las consideraciones precedentes es que, en general, los sistemas de medición de una sola frecuencia no son adecuados para las misiones geodinámicas y de geodesia por satélite de gran precisión. Los sistemas de medición para ese género de misiones requieren por lo menos dos bandas de frecuencias suficientemente separadas en el espectro radioeléctrico.

CUADRO 1
Error ionosférico en un trayecto vertical con $CET = 20 \times 10^{16} \text{ el/m}^2$

Frecuencias		Errores de medición del trayecto		
Principal (MHz)	Auxiliar (MHz)	Error bruto en la frecuencia principal	Error residual	
			(Retardo de fase)	(Retardo de grupo)
400	150	50 m	0,24 m	0,48 m
2 000	400	2 m	0,42 cm	0,83 cm
1 575	1 227	3,2 m	0,15 cm	0,30 cm
8 000	2 000	12,5 cm	0,005 cm	0,01 cm

3.2 Anchura de banda necesaria

3.2.1 Anchura de banda necesaria para las mediciones de efecto Doppler

Debido al desplazamiento de frecuencia por efecto Doppler, la frecuencia recibida es superior o inferior a la frecuencia transmitida en una cantidad $+\Delta f$ o $-\Delta f$, según que la distancia en línea recta disminuya o aumente.

$$\Delta f = \frac{v}{\lambda} \text{ para las mediciones unidireccionales,}$$

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda} \text{ para las mediciones bidireccionales,}$$

siendo v la velocidad radial y λ la longitud de onda.

El cuadro 2 da la anchura de banda necesaria, $2\Delta f$ para $v = 9 \text{ km/s}$.

CUADRO 2
Anchura de banda necesaria para la medición del efecto Doppler correspondiente a una velocidad radial de 9 km/s

f (MHz)		150	400	2 000	8 000
λ (m)		2	0,75	0,15	0,0375
$2\Delta f$ (kHz)	Trayecto unidireccional	9	24	120	480
	Trayecto bidireccional	18	48	240	960

3.2.2 Anchura de banda necesaria para las mediciones de distancia

El principio de las mediciones de distancia radioeléctrica consiste en medir el retardo de propagación de fase o de grupo de las señales entre el vehículo espacial y la estación terrena. Sin embargo la medición no se realiza generalmente en la portadora debido a la ambigüedad de $n\lambda$ (unidireccional) o de $n\lambda/2$ (bidireccional). Con objeto de eliminar tal ambigüedad, las mediciones se llevan a cabo en señales que modulan a la portadora.

Se utilizan dos tipos principales de medición. En uno se mide el retardo de fase de varias señales sinusoidales, o tonos, que modulan simultáneamente o secuencialmente la portadora. El tono de frecuencia más bajo se utiliza para eliminar la ambigüedad, en tanto que el más alto determina la resolución de la distancia. Las frecuencias de modulación más altas son típicamente las de aproximadamente 1 a 10 MHz. Sin embargo, esta técnica presenta la desventaja de que concentra la energía de radiofrecuencia en rayas del espectro, por lo que su empleo puede resultar difícil en algunas de las bandas compartidas con servicios que requieran una protección definida en términos de un límite de la densidad espectral de potencia.

En el otro caso, se mide el retardo de grupo de un código de pseudoruido que va modulado en la portadora. La energía se difunde así por una banda de aproximadamente 1-10 MHz.

En ambos casos, la anchura de banda de radiofrecuencia es, tras la modulación de la portadora, de aproximadamente 2-20 MHz. Cabe pensar que en el futuro se utilicen anchuras de banda mayores.

Hay que añadir a esos valores el desplazamiento de frecuencia por efecto Doppler (véase el cuadro 2).

3.2.3 Anchura de banda necesaria para la transmisión de datos

La velocidad de transmisión de los datos auxiliares es del orden de varias decenas de bits por segundo. Esta información puede multiplexarse con las señales de medición de distancias.

3.3 Bandas de frecuencias utilizables

Las funciones de los sistemas de telecomunicaciones para la geodesia y la geodinámica por satélite guardan relación con el servicio de investigación espacial y el servicio de exploración de la Tierra por satélite. Además, algunos sistemas pertenecientes al servicio de radionavegación por satélite pueden ser explotados para fines de geodesia o de geodinámica.

El cuadro 3 indica algunas de las bandas de frecuencias utilizadas o previstas para la geodesia y la geodinámica por satélite.

**CUADRO 3
Bandas de frecuencias utilizadas o previstas en los sistemas de telecomunicaciones espaciales
aplicados a la geodesia y a la geodinámica**

Banda de frecuencias (MHz)	Dirección	Atribución
401-403	Tierra-espacio	Exploración de la Tierra por satélite
1 215-1 260	Espacio-Tierra	Radionavegación por satélite
1 559-1 610	Espacio-Tierra	Radionavegación por satélite
2 025-2 110	Tierra-espacio	Investigación espacial y exploración de la Tierra por satélite
2 200-2 290	Espacio-Tierra	Investigación espacial y exploración de la Tierra por satélite
7 190-7 235	Tierra-espacio	Investigación espacial
8 025-8 400	Espacio-Tierra	Exploración de la Tierra por satélite
8 450-8 500	Espacio-Tierra	Investigación espacial

Nota 1 – Las bandas atribuidas al servicio de radionavegación por satélite pueden ser utilizadas con estaciones de recepción para fines de geodesia y geodinámica.