

RECOMENDACIÓN UIT-R SA.1416*

**COMPARTICIÓN ENTRE LOS SENSORES PASIVOS A BORDO DE
VEHÍCULOS ESPACIALES Y EL SERVICIO ENTRE SATÉLITES
QUE FUNCIONA CERCA DE 118 GHz Y 183 GHz**

(Cuestión UIT-R 228/7)

(1999)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que la Resolución 723 (CMR-97) resuelve considerar el asunto de la atribución de bandas de frecuencias por encima de 71 GHz a los servicios pasivos;
- b) que la Recomendación UIT-R SA.515 indica que la banda 115-122 GHz es necesaria para que en la detección pasiva a bordo de vehículos espaciales se obtengan perfiles verticales de temperatura;
- c) que la Recomendación UIT-R SA.515 indica que la banda 175-192 GHz es necesaria para que en la detección pasiva a bordo de vehículos espaciales se obtengan perfiles verticales de vapor de agua;
- d) que la previsión meteorológica es un instrumento importante esencial para todas las actividades económicas humanas y también desempeña un papel predominante en la rápida identificación y avisos de fenómenos naturales potencialmente peligrosos;
- e) que los perfiles de temperatura atmosférica y de vapor de agua son datos esenciales necesarios para efectuar previsiones meteorológicas a escala mundial;
- f) que la banda de absorción del oxígeno en torno a 118 GHz y la banda de absorción de vapor de agua en torno a 183 GHz representan un recurso natural único para la determinación a distancia de los perfiles de temperatura y de vapor de agua en la atmósfera;
- g) que estas mediciones pasivas son extremadamente vulnerables a la interferencia debido a que la natural variabilidad de la atmósfera hace imposible reconocer y filtrar las mediciones perturbadas por la interferencia;
- h) que las mediciones de los sensores pasivos perturbadas por la interferencia pueden tener repercusiones muy negativas sobre los estudios del clima y sobre la calidad de las predicciones meteorológicas,

reconociendo

- a) que las bandas 116-126 GHz, 174,5-182 GHz y 185-190 GHz están actualmente atribuidas al servicio entre satélites (SES);
- b) que la Recomendación UIT-R SA.1029 proporciona criterios de interferencia para los sensores pasivos en las bandas 115-122 GHz y 175-192 GHz;
- c) que los estudios realizados en las bandas 116-122 GHz, 174,5-182 GHz y 185-190 GHz han demostrado que los enlaces entre satélites (EES) en los sistemas de satélites no geoestacionarios (no OSG) pueden provocar una interferencia en los sensores pasivos muy superior a la de estos criterios de protección (véase el Anexo 1);
- d) que los estudios realizados en estas bandas han demostrado que los EES en los sistemas de satélites geoestacionarios (OSG) pueden compartir la banda con sensores pasivos con restricciones adecuadas de la densidad de flujo de potencia (dfp) producida por los satélites OSG situados a la altitud orbital del sensor (véase el Anexo 1);
- e) que el número S9.7 del Reglamento de Radiocomunicaciones especifica que las estaciones de satélites que utilizan la órbita de los satélites geoestacionarios deben considerar otros sistemas de radiocomunicaciones espaciales y establecer coordinación con los mismos,

recomienda

- 1** que, teniendo en cuenta los *reconociendo* b) y c), los sensores pasivos y los EES de los sistemas de satélites no OSG no funcionen en modo cofrecuencia en las bandas 116-122 GHz, 174,5-182 GHz y 185-190 GHz;

* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de la Comisión de Estudio 4 de Radiocomunicaciones.

2 que, teniendo en cuenta el *reconociendo* d), los sensores pasivos y los EES de los sistemas de satélites OSG compartan la banda 116-122 GHz siempre que la d_{fp} procedente de una sola fuente en todas las altitudes comprendidas entre 0 y 1 000 km por encima de la superficie de la Tierra y en las proximidades de todas las posiciones orbitales geoestacionarias ocupadas por sensores pasivos, producida por una estación del SES, y para todas las condiciones y todos los métodos de modulación, no exceda de $-148 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot 200 \text{ MHz))}$ para cualquier ángulo de llegada;

3 que, teniendo en cuenta los *reconociendo* d) y e), los sensores pasivos y los EES de los sistemas de satélites OSG compartan las bandas 174,5-182 GHz y 185-190 GHz siempre que la d_{fp} procedente de una sola fuente en las altitudes comprendidas entre 0 y 1 000 km por encima de la superficie de la Tierra y en las proximidades de todas las posiciones orbitales geoestacionarias ocupadas por sensores pasivos, producida por una estación del SES y para todas las condiciones y todos los métodos de modulación, no exceda de $-144 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot 200 \text{ MHz))}$ para cualquier ángulo de llegada.

ANEXO 1

Viabilidad de la compartición entre el servicio de exploración de la Tierra por satélite (SETS) (sensores pasivos a bordo de vehículos espaciales) y el SES que funciona cerca de 118 GHz y 183 GHz

1 Introducción

Las bandas de frecuencias próximas a 118 GHz y 183 GHz están atribuidas al SETS a título primario para los sensores pasivos, como se indica en el Cuadro 1. La atribución próxima a 118 GHz está compartida con otros servicios. En las proximidades de 183 GHz, los servicios pasivos tienen una banda atribuida en exclusividad. Se ha observado la necesidad de que en esta banda se amplíe la gama de frecuencias en las que pueden realizarse mediciones pasivas, y por consiguiente, puede que los sensores pasivos deban compartir las bandas adyacentes con servicios activos. Es importante examinar la compartición de frecuencias:

- para determinar si las actuales atribuciones compartidas en 118 GHz protegen adecuadamente los sensores pasivos; y
- para determinar si la ampliación de la gama en la que pueden funcionar los sensores pasivos en las proximidades de 183 GHz puede provocar un posible problema de compartición con otros servicios.

CUADRO 1

Atribuciones del SETS en la banda 116-126 GHz y en las proximidades de 183 GHz

| Banda de frecuencias (GHz) | Atribuciones a los servicios (en todo el mundo) |
|----------------------------|---|
| 116-126 | EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (PASIVO) FIJO ENTRE SATÉLITES MÓVIL INVESTIGACIÓN ESPACIAL (PASIVO) |
| 174,5-176,5 | EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (PASIVO) FIJO ENTRE SATÉLITES MÓVIL INVESTIGACIÓN ESPACIAL (PASIVO) |
| 176,5-182 | FIJO ENTRE SATÉLITES MÓVIL |
| 182-185 | EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (PASIVO) RADIOASTRONOMÍA INVESTIGACIÓN ESPACIAL (PASIVO) |
| 185-190 | FIJO ENTRE SATÉLITES MÓVIL |

2 Características de los equipos

2.1 Sensores pasivos

2.1.1 Sensores de exploración en órbita terrena baja (LEO)

El sensor pasivo en LEO utilizado en este análisis se ha modelado a partir de la unidad avanzada de detección por microondas (AMSU, *advanced microwave sensing unit*). El AMSU-B ya funciona a 183 GHz y representa la actual tecnología en sensores de microondas.

El funcionamiento del sensor depende en gran medida de la antena de exploración mecánica. El reflector se desplaza dentro de una cubierta cilíndrica. El cilindro tiene una zona abierta que permite a la antena recibir la radiación transversal en torno a $\pm 50^\circ$ de la superficie de la Tierra y en el cielo nocturno hasta aproximadamente 85° a partir del nadir. La antena explora la Tierra, se desplaza hacia el cielo para realizar una medición de calibración en frío y a continuación vuelve al interior de la cubierta para efectuar una medición de calibración en caliente. El ángulo en el que la antena realiza la medición en frío viene limitado por el limbo de la Tierra y la superficie de la cubierta necesaria para cubrir la antena a fin de que ésta lleve a cabo una medición en caliente. Las mediciones de calibración se utilizan para determinar la ganancia del sistema de recepción. El esquema de exploración AMSU presenta la ventaja sobre otros de que todos los componentes de recepción siguen siendo los mismos entre las mediciones atmosféricas y de calibración.

Este método de exploración y calibración se utiliza en sensores situados en LEO. Como la órbita es heliosíncrona, el sensor puede realizar siempre una medición en frío en el mismo emplazamiento con respecto al vehículo espacial. La mayoría de los otros métodos correría el riesgo de tener que apuntar la antena de calibración al sol, imposibilitándoles una medición en frío.

2.1.2 Sensores en órbita geoestacionaria

Se han propuesto sensores que funcionen en la órbita geoestacionaria. Un tipo de antena de exploración similar a la del AMSU barrería la parte visible de la Tierra hasta unos $\pm 8^\circ$ con respecto al nadir del vehículo espacial. Si este sensor utiliza el espacio frío para la calibración, podría apuntar su antena de exploración a un punto fuera de la Tierra de forma similar al AMSU o podría tener una antena distinta para la calibración apuntada a cualquier emplazamiento conveniente. La antena de calibración en frío no debe sólo evitar la Tierra, sino también el Sol y, preferiblemente, la Luna. El sensor AMSU en órbita heliosíncrona puede realizar calibraciones en la misma posición con respecto al vehículo espacial y evitar siempre apuntar al Sol. Si el satélite OSG apunta a cualquier emplazamiento dentro de su plano orbital, es probable que en un instante determinado apunte al Sol o a la Luna y perturbe la medición en frío. Por consiguiente, se supone que el satélite OSG debe apuntar a la antena de calibración en frío en alguna dirección que no provoque que la antena dirija su objetivo al Sol, a la Tierra o a la Luna. El máximo aislamiento en la antena de calibración se logra si apunta en una dirección normal al plano ecuatorial. Con ello se dirige la antena de calibración al menos a 67° de distancia de la eclíptica, donde la ganancia direccional sería relativamente baja.

2.1.3 Sensores de barrido transversal

Actualmente no existen sensores de barrido transversal en funcionamiento y no se ha definido estrictamente ningún método de calibración. Este tipo de sensor funciona con una serie de pequeños haces de antena distribuidos a través del trayecto del vehículo espacial. Al igual que las púas de un peine, los haces múltiples realizan un barrido a lo largo del trayecto. Este sistema no es mecánico: cada haz de antena es fijo. Por consiguiente, los haces que apuntan a la Tierra no pueden utilizarse para realizar la calibración en frío. Si se utiliza una antena distinta, no está tan limitada como la antena AMSU en ganancia o en ángulo de calibración. La única limitación es que debe apuntar al espacio frío. Si se utilizan órbitas heliosíncronas, la mejor dirección es una alejada del Sol, que es donde apunta el AMSU. Sin embargo, estos sensores pueden utilizar ángulos por encima del límite de 85° impuesto por la cubierta del AMSU.

2.1.4 Sensores de sondeo del limbo

Los sensores de sondeo del limbo tienen características distintas del AMSU-B, pero no se consideran en este análisis.

2.1.5 Características de los sensores

En el Cuadro 2 se indican las características de los sensores AMSU y OSG. En este análisis se han considerado dos modos de funcionamiento del sensor:

- modo exploración y
- modo calibración.

Los ángulos de puntería para estos dos modos se indican en el Cuadro 2.

CUADRO 2
Características del sensor pasivo

| Parámetro | AMSU-B | OSG |
|---|------------------------------|--------------|
| Ganancia del haz principal de la antena (dBi) | 45 | 66 |
| Ganancia del lóbulo posterior de la antena (dBi) | -14 | -14 |
| Anchura del haz de la antena entre puntos de potencia mitad (grados) | 1,15 | 0,102 |
| Gama de las altitudes del sensor (km) | 500 a 1 000 850 (nominal) | 35 786 |
| Criterio de referencia por anchura de banda (dB(W/200 MHz)) | -160 | -160 |
| Ángulos de exploración para las mediciones de la antena (a partir del nadir) (grados) | ± 50 | ± 8 |
| Ángulo de calibración en frío (a partir del plano orbital) (grados) | 90 ± 4 | 90 |
| Gama de ángulos de calibración en frío (a partir del nadir) (grados) | 65 a 85 83 (nominal) | 90 (nominal) |

La gama de funcionamiento práctico para los sensores en LEO se encuentra entre unos 500 km y 1 000 km, aproximadamente. Los sistemas de sensores en funcionamiento o previstos en esta banda tienen la órbita a una altitud nominal de 833 km. Sin embargo, las órbitas utilizadas por sistemas actualmente en funcionamiento varían en altitud hasta 20 km.

2.2 Sistemas entre satélites

2.2.1 Sistemas modelados

En el Cuadro 3 aparecen las características de un sistema entre satélites modelado en este análisis. Se supone que es un sistema digital de banda ancha con una velocidad de transmisión de datos de 200 Mbit/s, elegida para que se adapte a la anchura de banda de referencia del sensor. Este análisis también es aplicable a sistemas de banda más ancha que tienen una potencia proporcionalmente mayor.

CUADRO 3
Parámetros del EES

| Parámetro | Valor |
|--|---|
| Ganancia del haz principal de la antena (dBi) | 45, 50, 55 ó 60 |
| Ganancia del lóbulo posterior de la antena (dBi) | -10 |
| Temperatura de ruido del sistema (K) | 2 000 en torno a 118 GHz y 3 000 en torno a 183 GHz |
| Criterio de calidad del enlace, C/N (dB) | 12 |

La C/N de enlace elegida es de 12 dB, que incluye una E_b/N_0 de 10 dB para MDP-4 y unas pérdidas de realización de 2 dB. La temperatura de ruido del sistema se obtiene a partir del diseño del sistema de EES en las bandas inferiores y los receptores construidos para el AMSU-B. Se examina una gama de ganancias de antena comprendida entre 45 dBi y 60 dBi. Generalmente, se elige la antena de 45 dBi para enlaces de baja altitud y las de ganancia más elevada de 55 dBi o 60 dBi para altitudes mayores y enlaces más largos. Los diagramas de los lóbulos laterales de la antena se han modelado utilizando el diagrama de antena de haces circulares con un solo alimentador de la Recomendación UIT-R S.672.

El análisis se limitó a sensores de exploración y sistemas entre satélites en órbitas circulares. Los EES se limitan a una red de satélites con la misma altitud orbital.

2.2.2 Sistemas operacionales en otras bandas

No se conocen actualmente sistemas entre satélites que funcionen en las bandas consideradas en este análisis. En los registros de la UIT existen notificaciones de que Belarús, Malasia y Estados Unidos de América tienen intención de explotar sistemas espacio-espacio en la banda 116-126 GHz. No existen notificaciones anticipadas de EES en las proximidades de 183 GHz. De los sistemas que funcionan en estas bandas, la mayoría se encuentran en la OSG o LEO, nominalmente entre 700 y 800 km. Algunos sistemas funcionan por encima del sensor en órbitas que oscilan entre 1 000 km y 10 350 km. Estos sistemas emplean constelaciones de múltiples satélites para lograr una completa cobertura de la Tierra.

En el Cuadro 4 aparecen varias constelaciones de satélites EES no OSG en funcionamiento o propuestas. Para cada constelación se indican los ángulos geocéntricos subtendidos por los enlaces.

CUADRO 4

Ejemplo de constelaciones de satélites no OSG

| Sistema | Número de órbitas | Número de satélites por órbita | Separación dentro de la órbita (grados) | Separación entre órbitas (grados) | Altitud orbital (km) |
|-----------|-------------------|--------------------------------|---|-----------------------------------|----------------------|
| Sistema A | 6 | 11 | 32,7 | 60 | 780 |
| Sistema B | 3 | 4 | 90 | 120 | 10 350 |
| Sistema C | 8 | 6 | 60 | 45 | 1 414 |
| Sistema D | 4 | 8 | 45 | 90 | 775 |
| Sistema E | 21 | 40 | 9 | 17,1 | 700 |
| Sistema F | 6 | 8 | 45 | 60 | 950 |
| Sistema G | 4 | 6 | 60 | 90 | 800 |
| Sistema H | 2 | 5 | 72 | 180 | 500 |
| Sistema I | 6 | 4 | 90 | 60 | 1 000 |

Los sistemas de satélites OSG existentes o previstos que funcionan en otras bandas no tienen, generalmente, los satélites uniformemente espaciados. Por ejemplo, uno de estos sistemas muestra cinco enlaces con ángulos geocéntricos variables: 149°, 31°, 85°, 85° y 125°. En el Cuadro 5 aparece la máxima separación longitudinal para las constelaciones de satélites OSG junto con sus ganancias de antena.

CUADRO 5

Parámetros de ejemplos de sistemas entre satélites OSG

| Sistema | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|-------|-------|------|------|------|-------|------|-------|------|-------|
| Ganancia de antena (dBi) | 58,5 | 59 | 58 | 46 | 55,5 | 60,3 | 53 | 50,3 | 49,1 | 55,7 |
| Separación longitudinal máxima (grados) | 162,6 | 162,6 | 78,6 | 10,1 | 67,3 | 162,6 | 53,9 | 111,1 | 77,4 | 136,4 |

3 Método

Este análisis considera una amplia gama de parámetros para constelaciones EES y determina las restricciones a dichos parámetros que podrían permitir la compartición cocanal. La compartición se considera viable únicamente si las restricciones en los parámetros EES permiten el desarrollo de sistemas similares a los previstos en otras bandas.

La interferencia inaceptable al servicio de exploración de la Tierra por satélite (pasivo) viene determinada por dos criterios. En primer lugar, existe un umbral de interferencia de -160 dB(W/200 MHz). La interferencia por encima de este nivel debe considerarse inaceptable. Este nivel de potencia corresponde al 20% de la sensibilidad del sensor (Recomendación UIT-R SA.1029). La interferencia recibida por encima de este nivel aumentará la lectura de temperatura que realiza el satélite y perturbará las medias de temperatura a largo plazo. Deben añadirse otros -3 dB a la sensibilidad para tener en cuenta la compartición entre los servicios espaciales y terrenales. El segundo criterio es temporal y se aplica cuando se rebasa el nivel umbral del primer criterio. La interferencia no debe rebasar el umbral durante más del 0,01% del tiempo. Este porcentaje aparece en la *recomienda* 4 de la Recomendación UIT-R SA.1029.

3.1 Organización del análisis

El análisis se presenta en dos investigaciones. La primera es la interferencia causada a sensores en LEO por EES situados en órbitas que van desde órbitas próximas a la Tierra hasta la órbita geostacionaria. La segunda investigación es la interferencia causada a sensores situados en la órbita geostacionaria por EES OSG y no OSG.

Cada una de estas investigaciones se inicia con un análisis estático que identifica las circunstancias en las que puede producirse interferencia. Estas circunstancias son fundamentalmente las órbitas de los EES y la posición del transmisor EES con respecto al sensor. Estos parámetros de interferencia se aplican a un análisis temporal que identifica el número de transmisores que pueden funcionar sin rebasar el criterio temporal. Se investigan a continuación las circunstancias para determinar si puede evitarse la interferencia restringiendo los parámetros de funcionamiento de los EES o los sensores pasivos. Por último, se determinan las restricciones del número de EES, de longitud de los trayectos entre satélites y de puntería de las antenas del sensor. Estas restricciones se comparan con las de los sistemas en funcionamiento o previstos en otras bandas a fin de determinar si son posibles.

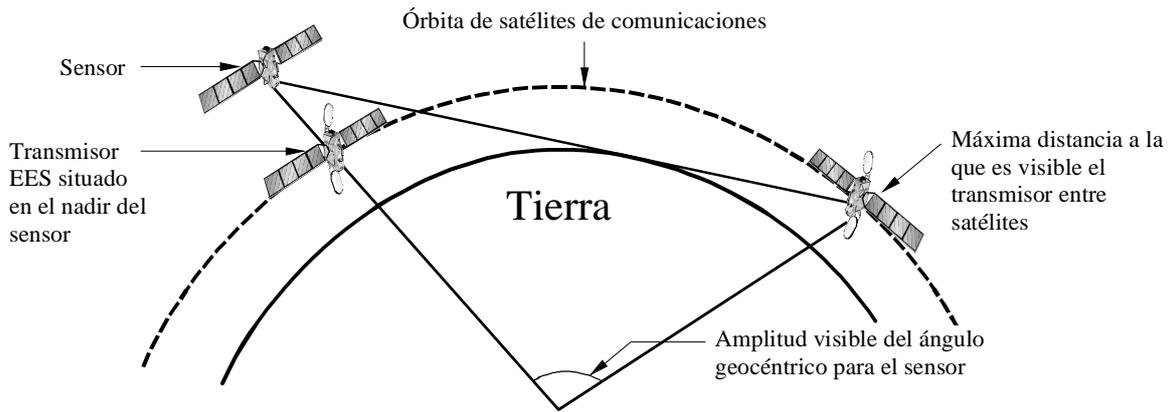
3.2 Determinación de las geometrías que producen interferencia

El análisis examina el acoplamiento de antena para todas las posibles orientaciones del sensor y del transmisor EES. Se efectúa el análisis de las posiciones relativas del satélite del sensor y los satélites interferentes para determinar las posiciones u orientaciones que producen interferencia. En esta investigación se consideran las diferencias de altitud, los ángulos geocéntricos entre el sensor y el transmisor EES y las orientaciones de la antena. Se analizan en primer lugar los EES con el centro del trayecto a 200 km por encima de la Tierra para mantener dicho trayecto por encima de la atmósfera. Se reduce a continuación la longitud del trayecto entre satélites en términos de ángulo geocéntrico mientras se observan las orientaciones de máxima interferencia para determinar la máxima longitud del enlace que evita la interferencia inaceptable. Los resultados de este análisis identifican las orientaciones y configuraciones específicas que pueden producir interferencia. Se determina la relación entre el ángulo geocéntrico y la altitud que evita la interferencia.

Se ha creado un algoritmo a fin de calcular la potencia recibida de un satélite interferente en el sensor para variaciones de la altitud, de la longitud del trayecto entre satélites, del ángulo geocéntrico entre el sensor y el satélite interferente y de la ganancia de la antena EES. La potencia recibida en el sensor se calculó a partir del ángulo geocéntrico formado entre el sensor y el transmisor EES. Los ángulos geocéntricos variaban desde el horizonte hasta el nadir del sensor, como muestra la Fig. 1.

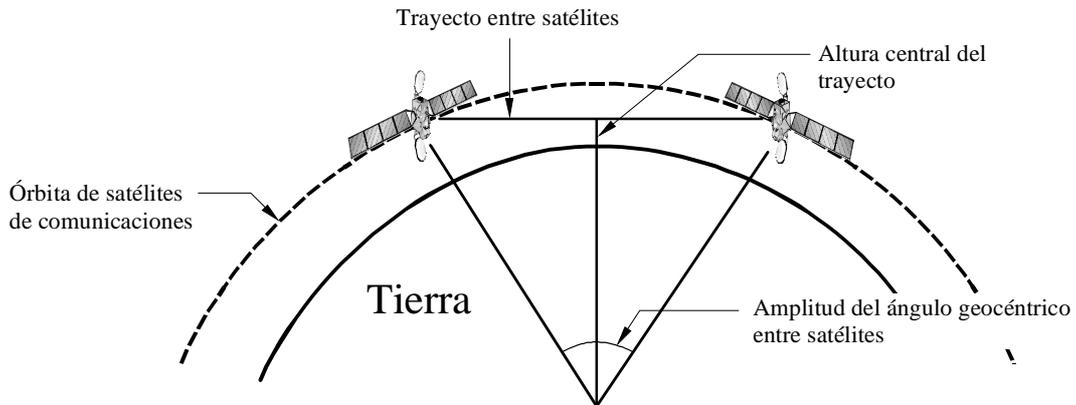
La potencia del transmisor se calcula de manera que mantenga una calidad del enlace constante, como se especifica en el Cuadro 3, teniendo en cuenta la distancia del trayecto EES y las ganancias de las dos antenas. La altura del trayecto entre satélites y el ángulo geocéntrico están relacionados y definen la longitud del trayecto EES. Esta geometría se ilustra en la Fig. 2.

FIGURA 1
Ángulos de visibilidad entre el sensor y el transmisor EES



1416-01

FIGURA 2
Geometría del EES



1416-02

La longitud del trayecto del EES se evaluó mediante la ecuación (1):

$$d_{enlace} = 2 \sqrt{(R_e + Alt_{no\ OSG})^2 - (R_e + Alt_{centro})^2} \quad (1)$$

siendo:

d_{enlace} : distancia (m) desde el satélite transmisor EES al satélite receptor EES

R_e : radio de la Tierra = 6 378 140 m

$Alt_{no\ OSG}$: altitud de la órbita no OSG (m)

Alt_{centro} : altitud del centro del trayecto del enlace no OSG (m) (véase la Fig. 2).

La potencia del transmisor EES se calculó mediante la ecuación (2):

$$P_t = -20 \log \left(\frac{0,3}{4\pi f d_{enlace}} \right) + 10 \log (k T B) 2G_{EES} + 12 \quad (2)$$

siendo:

- P_t : potencia del EES (dBW)
- f : frecuencia sintonizada del sensor (Hz)
- k : constante de Boltzman = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K
- B : anchura de banda de referencia del sensor (Hz)
- T : temperatura de ruido del receptor EES (K)
- G_{EES} : ganancia de las antenas EES (dBi) (suponiendo el mismo valor para el transmisor y el receptor)
- 12: nivel de calidad de funcionamiento del receptor EES ($C/N = 12$ dB).

A continuación, la potencia del transmisor calculada se utiliza para determinar la potencia de interferencia recibida considerando la longitud del trayecto entre el sensor y el transmisor más las ganancias relativas de las respectivas antenas dirigidas una a otra. La potencia recibida en el sensor se calcula para todas las distancias angulares geocéntricas a partir del horizonte mutuo hasta el punto en que los satélites están alineados con el centro de la Tierra (véase la Fig. 1). La potencia entregada al receptor del sensor se calculó mediante la ecuación (3):

$$P_r = P_t + G_{EES}(\varphi) + G_{sensor}(\alpha) + L_{el} \quad (3)$$

siendo:

- P_r : potencia de interferencia recibida (dBW)
- $G_{EES}(\varphi)$: ganancia dependiente del ángulo de la antena de transmisión EES
- φ : ángulo con respecto al haz principal entre la antena de transmisión EES y el receptor del sensor
- $G_{sensor}(\alpha)$: ganancia dependiente del ángulo de la antena del sensor dirigida al transmisor EES
- α : ángulo con respecto al eje de puntería de la antena del sensor dirigida hacia el transmisor EES
- L_{el} : pérdidas en espacio libre (dB) entre el transmisor EES y el receptor del sensor.

Se representó la relación entre la potencia recibida y el ángulo geocéntrico a medida que variaban los parámetros, gráfico con el que se identificaron las situaciones de interferencia más desfavorables y se determinaron las combinaciones de estos parámetros que eliminarían la interferencia.

3.3 Análisis temporal de las constelaciones que producen interferencia

El resultado del punto anterior identifica las orientaciones del sensor y del satélite interferente que producen interferencia, fundamentalmente a través del acoplamiento del haz principal. Se ha aplicado a estas orientaciones el criterio temporal del 0,01%.

El análisis considera la interferencia procedente de constelaciones con órbitas por encima y por debajo del sensor. Se analiza la constelación EES como si se tratase de una distribución aleatoria de satélites EES en una esfera.

Se considera que la interferencia procede de cualquier posición de la esfera de la constelación EES para la cual la señal recibida en el sensor en esa posición rebasa el umbral de interferencia. En cada posición, la interferencia excesiva procede de una pequeña superficie elíptica o circular en la esfera cuya área se determina a partir de la ganancia de haz principal de la antena y de la distancia de dicha esfera al sensor. Estas pequeñas superficies son las intersecciones del haz principal de la antena del sensor con la esfera de la constelación.

Si se admite la hipótesis de una distribución aleatoria de satélites en la esfera de la constelación EES, una relación de superficies puede representar la cantidad de interferencia a lo largo del tiempo. Para un solo satélite, se trata de la relación entre la superficie de interferencia en la esfera y la superficie total de la esfera.

El análisis temporal proporciona el porcentaje de tiempo durante el cual un solo satélite en una constelación EES rebasa el umbral de interferencia. La comparación de esta cifra con el criterio temporal del 0,01% determina el número máximo de satélites EES a los que se permite rebasar el umbral de potencia de interferencia.

El análisis estático se repite para los sensores en órbita geoestacionaria, pero como los EES en dicha órbita están fijos, no es necesario realizar ningún análisis temporal. Se realizará un análisis de este tipo utilizando la técnica de relación de superficies para considerar la interferencia procedente de las constelaciones de satélites situados en LEO.

3.4 Comparación

En resumen, el análisis de interferencia inicial indica las restricciones necesarias de altitud orbital y de ángulo geocéntrico para evitar la interferencia. En las configuraciones de satélites que no aplican estas restricciones, un análisis temporal determina el número de satélites que pueden rebasar el umbral de potencia cumpliendo el criterio temporal del 0,01%. Los parámetros de las constelaciones de satélites planificadas para otras bandas se comparan con estas restricciones a fin de evaluar si es posible llevarlas a la práctica a fin de que los sistemas de satélites puedan compartir estas bandas con los sensores pasivos.

4 Análisis

4.1 Interferencia causada a sensores en LEO

4.1.1 Determinación de las circunstancias que producen interferencia

Inicialmente es necesario establecer en qué circunstancias, caso de existir, los niveles de potencia de un EES podrían rebasar los umbrales de interferencia del sensor. Con ese objetivo, se realizaron una serie de cálculos con el sensor y el transmisor EES para diversas orientaciones relativas entre sí. A fin de representar las orientaciones del caso más desfavorable, el sensor, EES y el centro de la Tierra se situaron en el mismo plano. El transmisor EES se colocó en un plano normal al plano orbital del sensor. La antena EES se consideró apuntada en la dirección del sensor. La Fig. 1 muestra la gama de ángulos entre el horizonte y el nadir del sensor en la cual se realizaron los cálculos. En las Figs. 3 y 4 aparecen los gráficos relativos a la potencia de interferencia causada al sensor por los EES en la gama de ángulos señalada en la Fig. 1. La Fig. 3 representa la potencia de interferencia para el sensor en el modo exploración y la Fig. 4 en el modo calibración.

FIGURA 3
Potencia de interferencia - Modo exploración

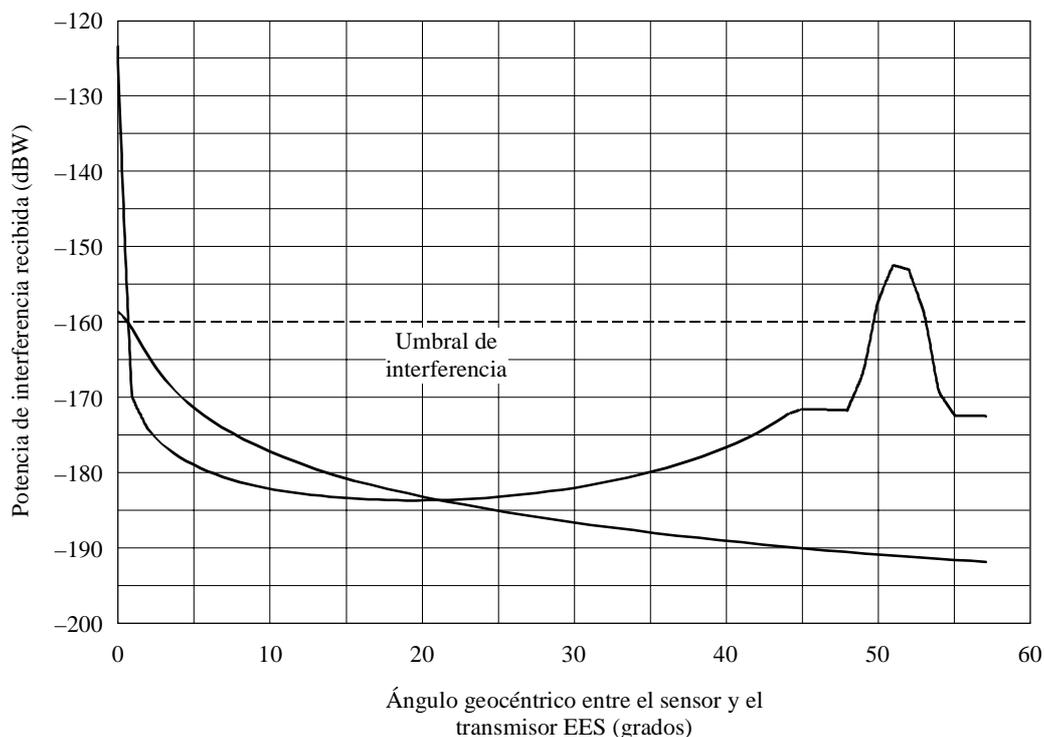
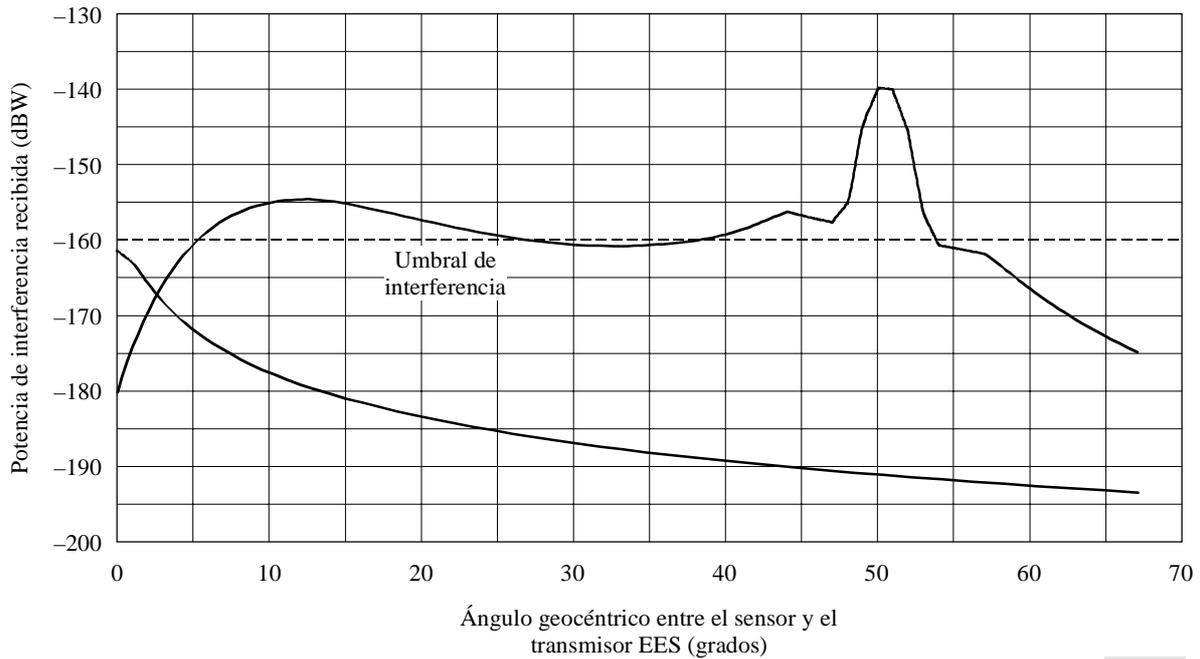


FIGURA 4
Potencia de interferencia - Modo calibración

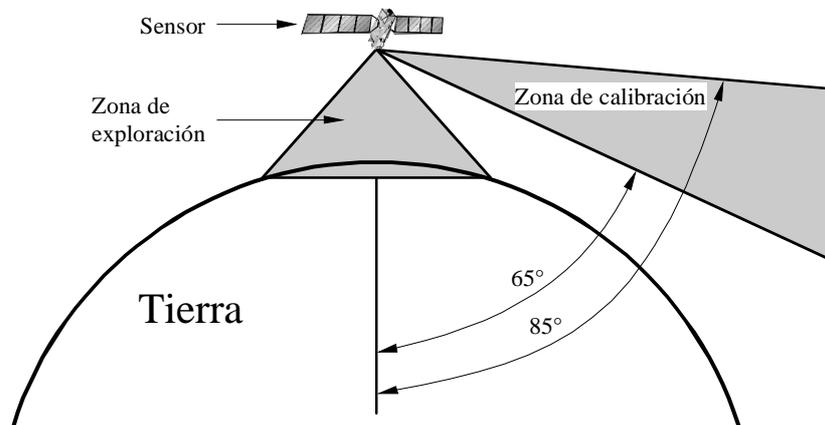


1416-04

En las Figs. 3 y 4 se representan tres líneas. La línea horizontal a -160 dBW representa el umbral de interferencia del sensor. La línea curva inferior es un gráfico de la potencia de interferencia recibida por el sensor suponiendo que tanto el sensor como el transmisor EES tienen antenas omnidireccionales de ganancia 0 dBi. La tercera línea con crestas representa la potencia de interferencia con ganancias directivas para el sensor y el transmisor EES. Las magnitudes relativas de las curvas de interferencia muestran el efecto de las antenas de alta ganancia. Observando la Fig. 3, puede verse que la curva de la antena omnidireccional sólo rebasa el umbral cuando el transmisor EES se encuentra muy próximo al sensor y el ángulo geocéntrico subtendido es casi de 0° . La curva de la antena de alta ganancia rebasa el umbral de interferencia cuando el transmisor EES está próximo a 0° y en el haz principal de la antena del sensor y cuando el transmisor EES está próximo del horizonte y su haz principal ilumina al sensor. En la Fig. 4 puede observarse que el nivel de interferencia se encuentra por encima del umbral cuando el transmisor EES está próximo al haz principal de la antena de calibración del sensor y nuevamente cuando el sensor se encuentra en el haz principal de la antena del transmisor EES.

En ambas Figuras puede verse que los niveles de interferencia son elevados si el transmisor EES se encuentra próximo al haz principal de la antena del sensor. La Fig. 5 representa las gamas en las que podría funcionar la antena del sensor.

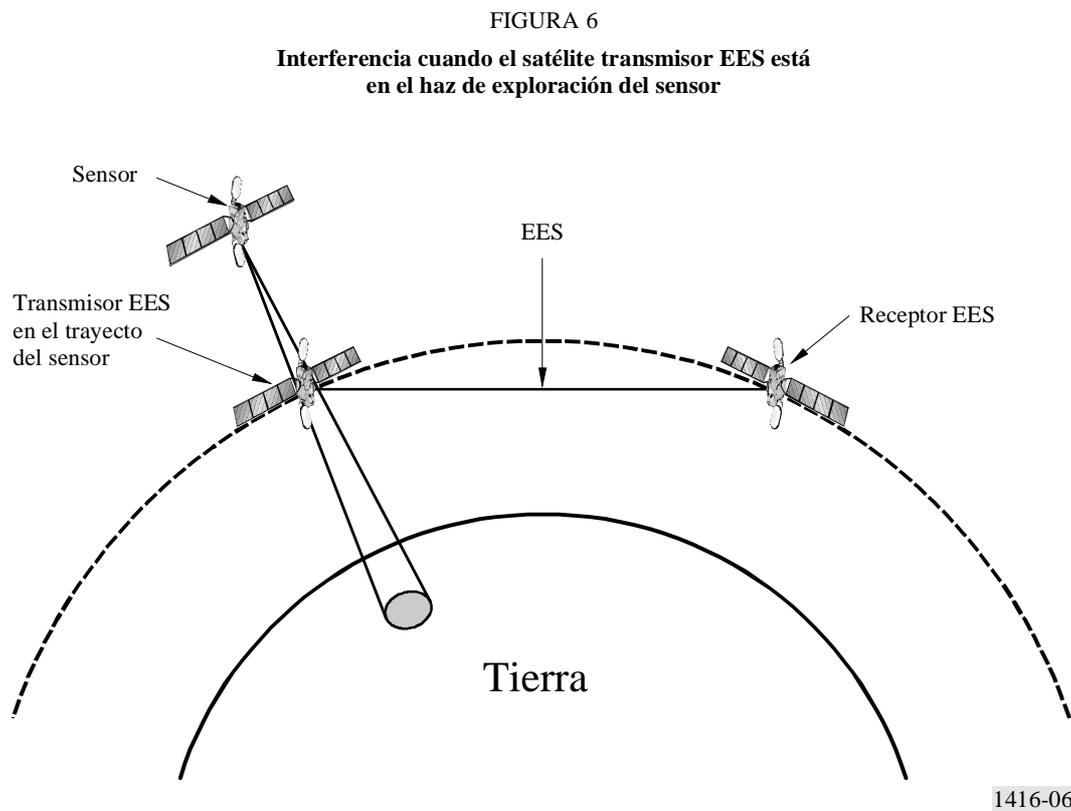
FIGURA 5
Ángulos del sensor y gamas para los modos exploración y calibración



1416-05

La Fig. 5 puede aplicarse a los sensores AMSU y a los sensores de barrido transversal. La exploración del AMSU se realiza en la gama que la antena barre durante el funcionamiento. En el caso del sensor de barrido transversal, múltiples haces cubren continuamente esta zona. La zona de calibración presentada en la Figura indica la gama de ángulos que puede utilizar el sensor AMSU. En funcionamiento utilizará únicamente un solo ángulo, con un valor nominal de aproximadamente 83° . El sensor de barrido transversal puede utilizar una antena distinta para la calibración en frío y no presenta tantas limitaciones como el AMSU. Puede apuntar en cualquier dirección que no incluya la Tierra. Pero como consideración secundaria también debe evitar el Sol. Si se utiliza una órbita heliosíncrona, como se supone, podría apuntar hacia el horizonte o por encima del mismo. También puede apuntar a lo largo del plano orbital o en forma oblicua al mismo.

Puede producirse interferencia excesiva cuando el transmisor EES se encuentra en el haz principal de sensor, es decir en las zonas sombreadas de la Fig. 5. Por lo tanto, el modo exploración recibe interferencia en el haz principal de su antena procedente de constelaciones con órbitas por debajo del sensor. En cambio, el modo calibración del sensor está sujeto a interferencia a su haz principal procedente de satélites cuyas órbitas se encuentran por debajo y por encima de la órbita del sensor. Esas orientaciones de interferencia se ilustran en las Figs. 6 y 7.



También se produce interferencia como se determinó anteriormente cuando el haz principal del transmisor EES intercepta al sensor. Las Figs. 8 y 9 ilustran la intersección del haz principal por constelaciones situadas por debajo y por encima del sensor.

4.1.2 Análisis temporal

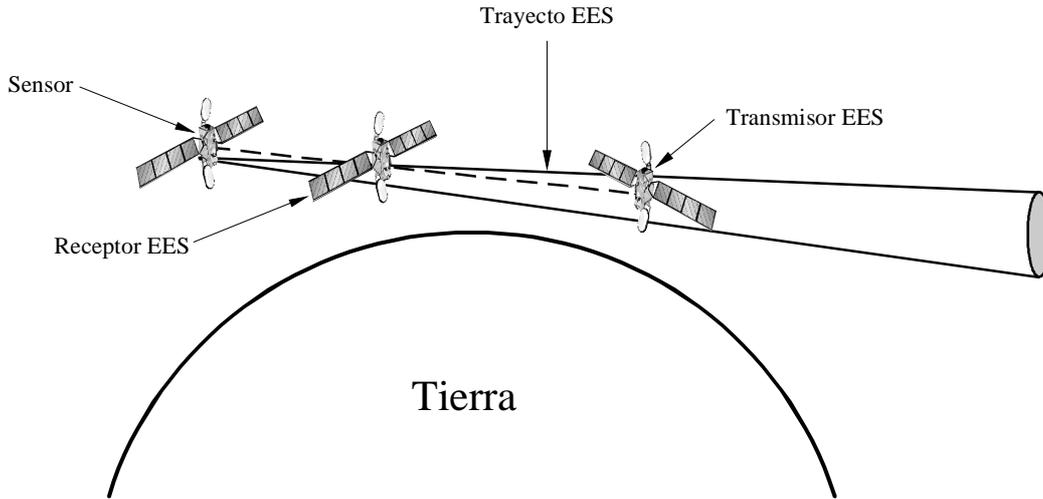
4.1.2.1 Análisis en baja altitud

Se identificaron tres zonas de interferencia:

- por debajo del sensor en el modo exploración cuando el haz principal del sensor se acopla con el lóbulo lateral EES;
- hacia el lado del sensor en el modo calibración, cuando la antena de calibración del sensor se acopla con el lóbulo lateral del satélite del transmisor EES; y
- donde el haz principal del transmisor EES se acopla con el lóbulo lateral del sensor.

FIGURA 7

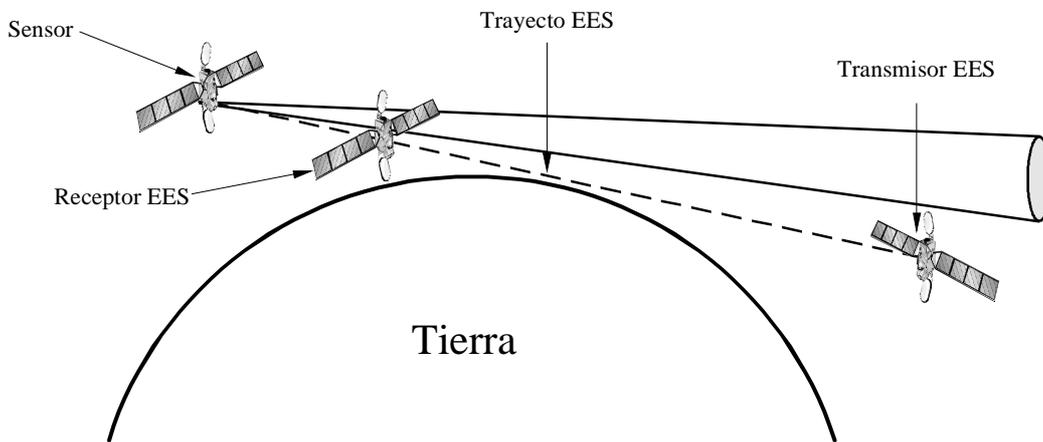
Interferencia cuando el transmisor EES está en el haz principal de la antena de calibración



1416-07

FIGURA 8

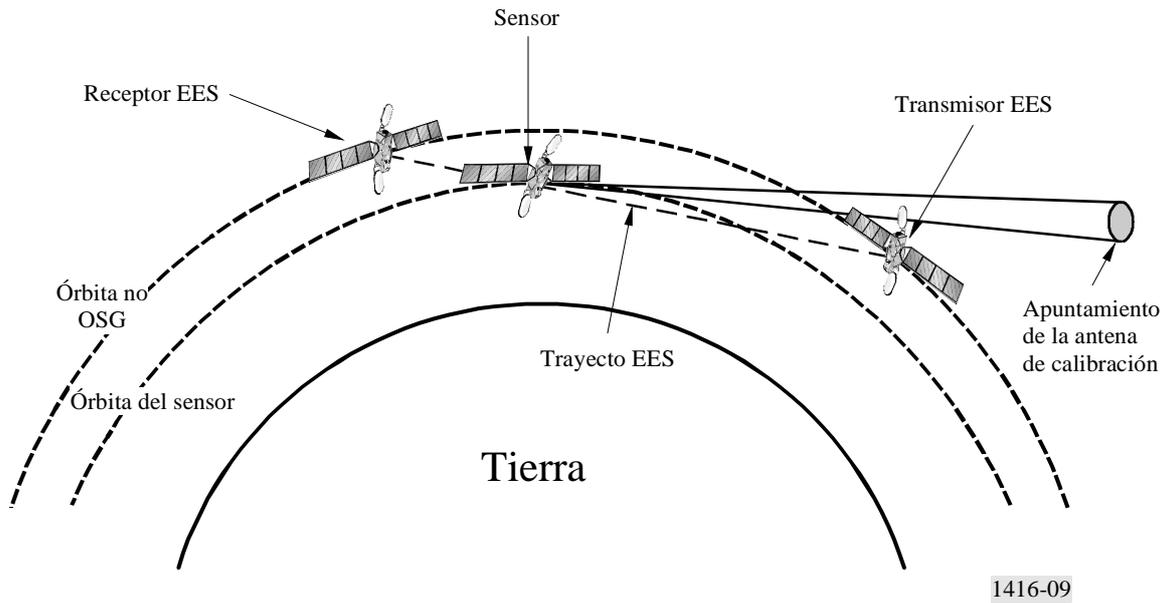
Interferencia en el modo calibración producida por el haz principal de la antena del transmisor EES o una constelación en órbita por debajo del sensor



1416-08

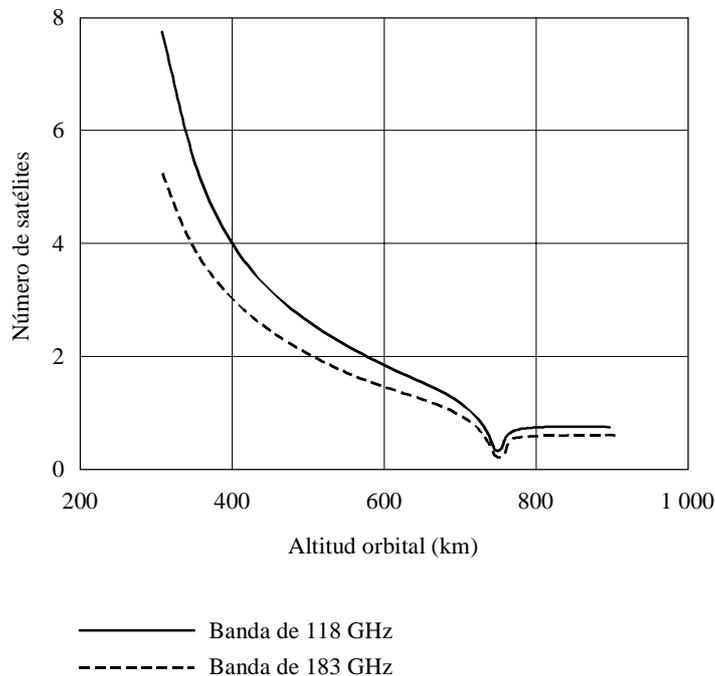
Los resultados de este análisis (véase la Fig. 10) demuestran que un máximo de ocho satélites en la esfera orbital completa pueden compartir la banda de 118 GHz, y cinco satélites pueden compartir la banda de 183 GHz, si se hallan en una órbita de altitud próxima a 300 km. El número de satélites que pueden compartir desciende a dos a una altitud de alrededor de 500 km, y a cero a una altitud de 900 km. La curva es una combinación de las tres posibilidades para las tres zonas de interferencia causadas por el acoplamiento del haz principal con la antena de exploración del sensor, la antena de calibración y la antena del transmisor EES. El mecanismo de interferencia predominante es la transmisión de haz principal EES a los lóbulos laterales del sensor. A 749 km de altitud, la interferencia producida a la antena del sensor durante la calibración predomina en la curva compuesta.

FIGURA 9
Interferencia en el modo calibración producida por el haz principal de la antena del transmisor EES o una constelación en órbita por encima del sensor



1416-09

FIGURA 10
Número de satélites en una constelación LEO que cumple el criterio del 0,01%



1416-10

El ángulo de calibración para el sensor influye en la posibilidad de compartición, como se ilustra más arriba. Generalmente, cuando puede recibirse interferencia en la antena de calibración, sólo un satélite puede compartir sin infringir el criterio del 0,01%. Como el ángulo de calibración varía de 65° a 85°, la altitud de interferencia máxima se desplaza hacia arriba. El Cuadro 6 muestra la altitud de máxima interferencia para la gama de ángulos de calibración de 65° a 85°, en la que el mínimo número de satélites pueden compartir.

CUADRO 6

Altitud de mínima interferencia causada a la antena del sensor en el modo calibración

| Ángulo de calibración (grados) | Altitud de mínima interferencia (km) |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| 65 | 308 |
| 70 | 555 |
| 75 | 749 |
| 80 | 888 |
| 85 | 971 |

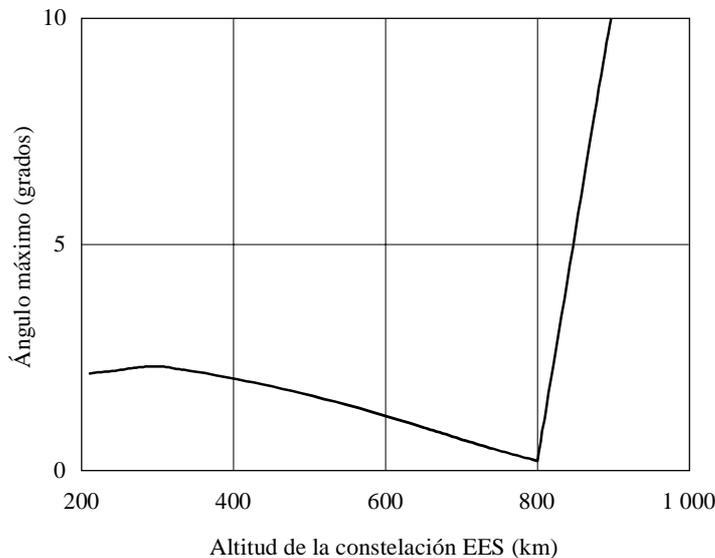
4.1.3 Análisis de la evitación de interferencia en los EES

Las longitudes de trayecto EES consideradas hasta ahora producen la máxima cantidad de interferencia porque eran los trayectos más largos los que exigían la potencia de transmisor más alta. Todo lo que reduzca la p.i.r.e. del satélite reducirá los niveles de interferencia. Dos factores que afectan a la p.i.r.e. son la ganancia de antena y la longitud del trayecto. Si el EES estuviera diseñado con antenas de transmisión y de recepción adaptadas, cada decibelio de aumento de la ganancia de antena origina un aumento de 2 dB en la potencia de señal recibida EES. Para mantener la misma potencia de señal recibida, la potencia del transmisor EES puede por tanto reducirse 2 dB. Dicho de otro modo, cada decibelio de aumento de la ganancia del haz principal de la antena origina una reducción de 1 dB en la p.i.r.e. del haz principal y una reducción en la radiación de lóbulos laterales. La p.i.r.e. requerida es también proporcional al cuadrado de la distancia, por lo que la reducción de la longitud del enlace reduce la p.i.r.e. y por tanto la potencia de interferencia recibida. Existe una longitud de trayecto EES máxima para cada altitud a la que no aparece interferencia inaceptable.

Las Figs. 11 y 12 muestran el ángulo geocéntrico máximo para EES que impide que aparezca interferencia inaceptable. Estos resultados se obtuvieron calculando la potencia de interferencia en el sensor, y reduciendo la longitud del trayecto EES hasta que esta potencia cae por debajo del umbral de -163 dBW. La ganancia de antena de transmisión y de recepción EES es de 45 dBi.

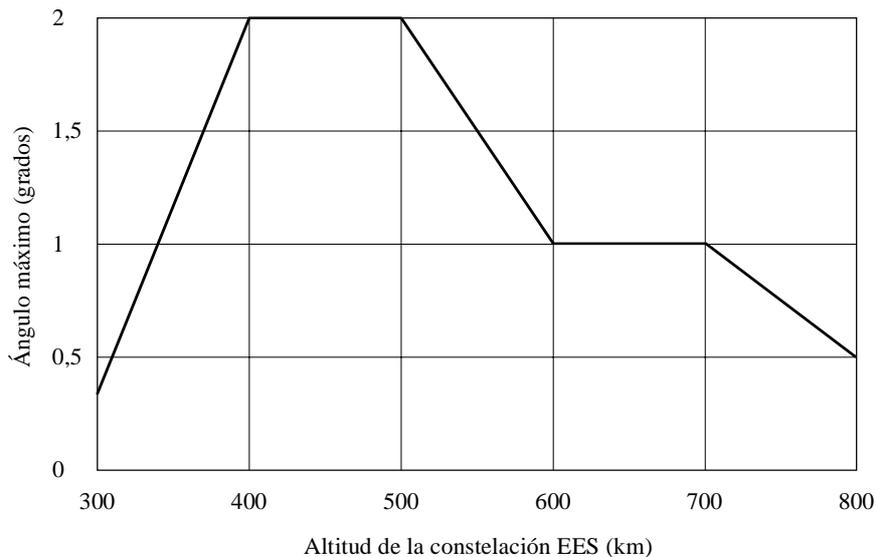
FIGURA 11

Ángulo geocéntrico máximo para que el sistema entre satélites evite causar interferencia a los sensores a bordo de un vehículo espacial cuando el sensor está en el modo exploración a 850 km de altitud



La Fig. 11 representa el caso del sensor a una altitud de 850 km en el modo exploración con los enlaces EES por debajo y ligeramente por encima del mismo. El ángulo geocéntrico máximo es de 2° o menor para el modo exploración hasta que la constelación EES está por encima de la altitud del sensor. El ángulo máximo se aproxima a cero cuando las altitudes de la constelación EES y del satélite sensor son iguales. En el modo calibración, presentado en la Fig. 12, el ángulo máximo es menor que 1°. Por tanto, el modo calibración es más susceptible a la interferencia.

FIGURA 12
Ángulo geocéntrico máximo para que el sistema entre satélites evite causar interferencia a los sensores a bordo de un vehículo espacial cuando el sensor está en el modo calibración a 83° y 850 km de altitud



1416-12

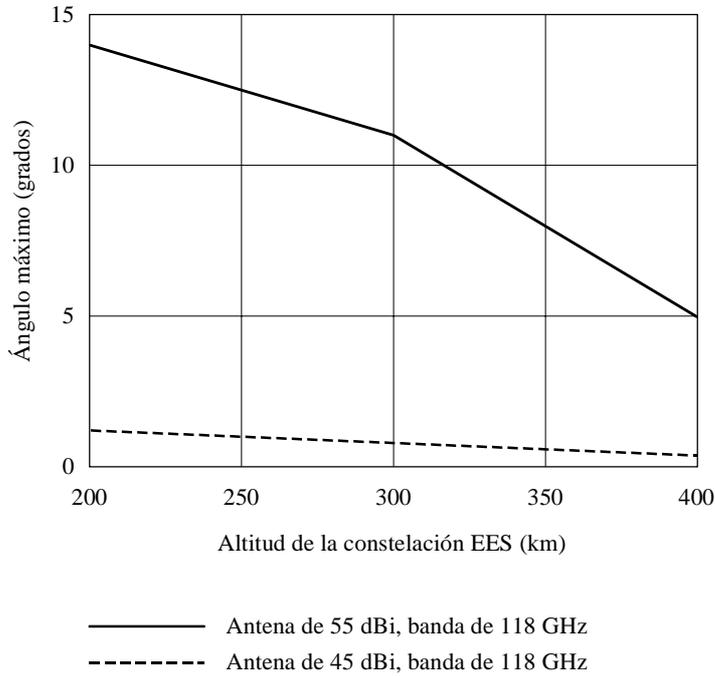
La gama de órbitas utilizables para los sensores es de 500 km a 1000 km. En la Fig. 11 puede observarse que la compartición no es realizable cuando los EES están a la misma altitud, pero las posibilidades de compartición aumentan a medida que la órbita del transmisor EES queda por debajo del sensor. Como el sensor puede estar en cualquier punto comprendido entre 500 km y 1000 km, los EES no pueden ocupar esta gama orbital. Las posibilidades de compartición se hallarían por debajo de 500 km para un sensor a 500 km y por encima de 1000 km con el sensor a esa altitud. Las Figs. 13 y 14 muestran las restricciones angulares cuando el sensor está a 500 km para los modos exploración y calibración, respectivamente. Las Figs. 15 y 16 muestran análogamente las restricciones angulares para el sensor a una altitud de 1000 km con los EES por encima del mismo. En estas Figuras se investigaron dos ganancias de antena para el EES. Se proporcionan gráficos para una antena de 45 dBi y 55 dBi en el EES.

Aumentando la ganancia de antena en el EES aumentan los ángulos del enlace que evitan la interferencia. En primer lugar, esto se debe a que se requiere menos p.i.r.e. de transmisor EES. En segundo lugar, la antena del transmisor EES tiene un haz más estrecho, lo cual reduce las emisiones fuera del lóbulo principal.

En el caso de que el EES se halle por encima del sensor a 1000 km, la ganancia de antena parece tener poco efecto en el modo exploración (Fig. 15) y el límite del ángulo geocéntrico del EES es menos restrictivo. La ganancia de antena del EES tiene más efecto en el modo calibración (Fig. 16). La antena de 45 dBi sigue siendo bastante limitada, mientras que la antena de 55 dBi no lo es. Las Figs. 14 y 16 muestran el aumento de compartición que puede obtenerse con antenas EES de ganancias superiores.

FIGURA 13

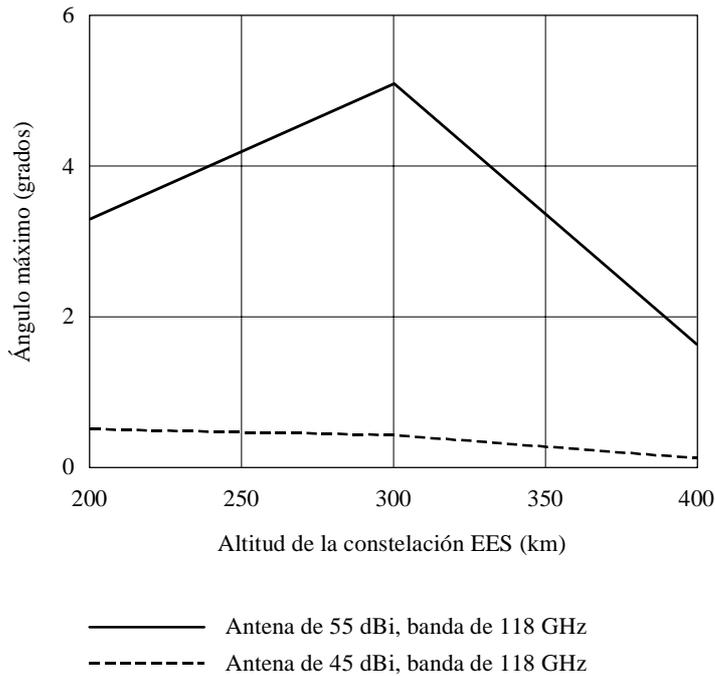
Ángulo geocéntrico máximo para que el sistema entre satélites evite causar interferencia a los sensores a bordo de un vehículo espacial cuando el sensor está en el modo exploración a 500 km de altitud



1416-13

FIGURA 14

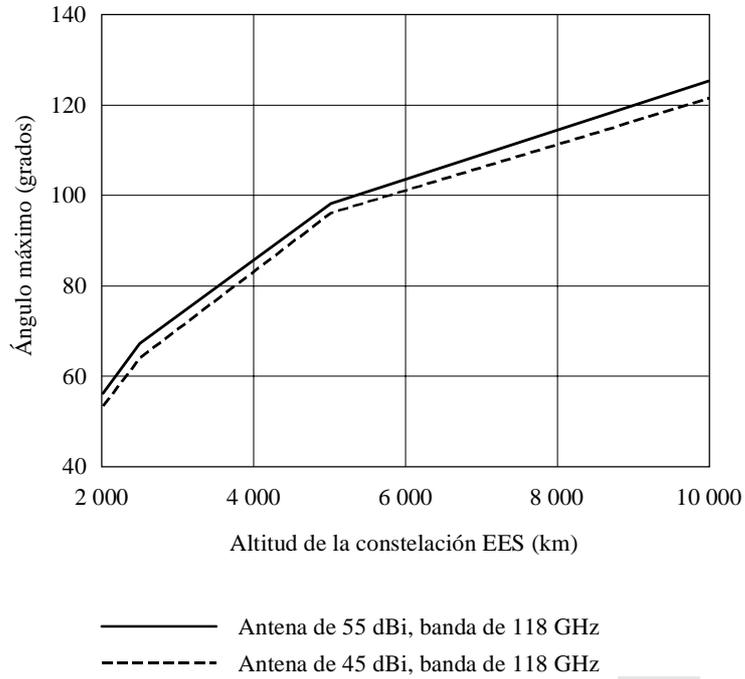
Ángulo geocéntrico máximo para que el sistema entre satélites evite causar interferencia a los sensores a bordo de un vehículo espacial cuando el sensor está en el modo calibración a 83° y 500 km de altitud



1416-14

FIGURA 15

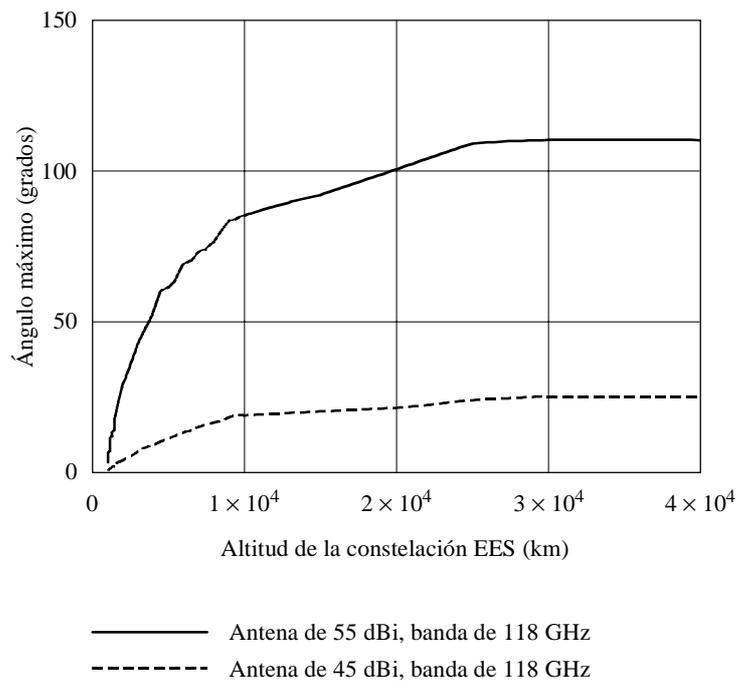
Ángulo geocéntrico máximo para que el sistema entre satélites evite causar interferencia a los sensores a bordo de un vehículo espacial cuando el sensor está en el modo exploración a 1 000 km de altitud



1416-15

FIGURA 16

Ángulo geocéntrico máximo para que el sistema entre satélites evite causar interferencia a los sensores a bordo de un vehículo espacial cuando el sensor está en el modo calibración a 83° y 1 000 km de altitud



1416-16

4.1.4 Restricciones del ángulo de calibración del sensor y de la ganancia de antena para facilitar la compartición

La calibración de la antena del sensor demostró ser el modo más restrictivo para restringir la compartición con el SES. La ganancia de antena y el ángulo de calibración del sensor se fijaron a 45 dBi y 83° para el análisis. Al igual que una ganancia de antena diferente reducía las restricciones de compartición en los EES, ajustes de la ganancia de antena y del ángulo de calibración podrían mejorar las posibilidades de compartición. Sin embargo, con la implementación de una antena de calibración diferente en los futuros sensores, es probable que la ganancia descienda en lugar de aumentar. Los Cuadros 7 y 8 presentan los resultados de una investigación sobre las restricciones causadas por las ganancias y la orientación de la antena del sensor.

El Cuadro 7 presenta los resultados de una investigación para determinar lo próximos que deben estar el transmisor y el receptor utilizados en el EES para evitar una interferencia excesiva. Se investigan altitudes tanto por encima como por debajo del sensor. El sensor se instaló a 850 km y el ángulo de calibración se fijó a 90° del nadir. Podría aplicarse el ángulo de calibración menos restrictivo si se utilizasen antenas separadas en la calibración. El ángulo geocéntrico máximo se indica en el Cuadro 7 para combinaciones de altitud orbital y de ganancia de la antena de calibración del EES.

CUADRO 7

Ángulo geocéntrico máximo del EES que protege completamente a los sensores de microondas pasivos en una órbita de 850 km

| Altura de la órbita no OSG (km) | Ganancia de la antena de calibración | | | |
|---------------------------------|--------------------------------------|--------|--------|--|
| | 45 dBi | 40 dBi | 35 dBi | 30 dBi |
| 300 | 2° | 5° | 10° | 20° (distancia máxima) ⁽¹⁾ |
| 400 | 2° | 4,4° | 8° | 21° |
| 500 | 1° | 3,3° | 5° | 13° |
| 600 | 1° | 1,9° | 3° | 8° |
| 700 | 0,5° | 1° | 2° | 3,8° |
| 800 | 0,2° | 0,2° | 0,5° | 0,9° |
| 1 500 | 2° | 4° | 7° | 12° |
| 2 000 | 4° | 7° | 12° | 18° |
| 2 500 | 7° | 11° | 14° | 25° |
| 3 000 | 8° | 13° | 20° | 30° |
| 5 000 | 13° | 21° | 31° | 45° |
| 10 000 | 17° | 27° | 40° | 59° |
| 15 000 | 21° | 33° | 49° | 67° |
| OSG | 134° | 143° | 149° | 153° |

⁽¹⁾ La entrada que indica (distancia máxima) significa que el enlace atravesaría la atmósfera antes de conseguirse los criterios de interferencia.

En el Cuadro 7 puede observarse también ahora que las ganancias de antena de calibración inferiores aumentarían las posibilidades de compartición. También mientras más próxima esté la órbita EES a la órbita del sensor, más restrictivos resultan los ángulos. Las restricciones resultan aún mayores cuando se tiene en cuenta que el análisis consideraba sólo una órbita de 850 km y los sensores podrían estar en una órbita de 500 a 1 000 km. Sin embargo, los ángulos no son muy restrictivos para los EES en la OSG considerando que el ángulo máximo que puede formar con la Tierra un enlace OSG sin bloqueo es de 162,6°.

El Cuadro 7 ilustra la sensibilidad de la ganancia de la antena de calibración y el ángulo de puntería a la interferencia producida por enlaces entre satélites en órbitas inferiores al sensor. Se presenta el ángulo de calibración mínimo que mantiene el nivel de interferencia por debajo del umbral, para combinaciones de altitud y de ganancia de la antena de calibración. El AMSU tiene una ganancia de antena de 45 dBi, pero el sensor de barrido transversal podría utilizar ganancias menores. En este ejemplo, el sensor está en una órbita de 850 km.

CUADRO 8

Ángulo de calibración mínimo con el nadir para proteger completamente a los sensores de microondas de calibración contra los EES con el sensor en una órbita de 850 km

| Altura de la órbita no OSG (km) | Ganancia de la antena de calibración | | | |
|---------------------------------|--------------------------------------|--------|--------|--------|
| | 45 dBi | 40 dBi | 35 dBi | 30 dBi |
| 300 | 145° | 115° | 97° | 86° |
| 400 | 170° | 130° | 105° | 91° |
| 500 | 175° | 135° | 110° | 93° |
| 600 | >180° | 145° | 115° | 96° |
| 700 | >180° | 145° | 120° | 100° |
| 800 | >180° | 145° | 120° | 100° |

NOTA 1 – Las entradas que indican >180° indican que no puede evitarse la interferencia excesiva.

En el Cuadro 8 puede observarse que mientras menor sea la ganancia de la antena de calibración, menor puede ser el ángulo de calibración sin recibir interferencia excesiva. Ninguno de los ángulos determinados en esta investigación eran tan bajos como la gama para el AMSU, lo que significa que no puede conseguirse protección para sensores similares al AMSU contra las órbitas de EES inferiores.

Una observación clara en este análisis es que las ganancias de ángulos de calibración inferiores aumentan las posibilidades de compartición con EES. Sin embargo, la antena de calibración debe ver sólo el espacio frío y antenas de menor ganancia tendrían diagramas de lóbulos laterales de antena más anchos y expondrían la antena de calibración parcialmente a la Tierra, a la atmósfera o al Sol. Además, una vista de antena más amplia expondría el receptor a interferencia procedente de múltiples EES. Sólo se considera aquí un enlace único. Aunque 30 dBi puede no ser la antena más pequeña utilizada en la calibración, tiene una anchura de haz de 6,5° y es probable que se halle próxima al límite.

4.1.5 Limitaciones de los EES en la OSG

Algunos sistemas OSG pueden cumplir los criterios de interferencia indicados desde los ángulos amplios presentados en el Cuadro 7. A fin de que la compartición se considere irrealizable, deben imponerse límites a los sistemas OSG para proteger los sensores pasivos. La situación más desfavorable se presenta cuando se produce acoplamiento directamente al haz principal del sensor durante la calibración. Por tanto, la fijación de un límite de dfp basado en el acoplamiento del haz principal protegería al sensor. El umbral de interferencia de -163 dBW por 200 MHz se traslada a una dfp de -145 dB(W/m²) a 118 GHz y a -141 dB(W/m²) a 183 GHz. Los cálculos se presentan en el Cuadro 9.

CUADRO 9

Determinación de la dfp para proteger a los sensores pasivos de las emisiones procedentes de EES en la órbita geoestacionaria

| Concepto | Banda de 118 GHz | Banda de 183 GHz |
|--|------------------|------------------|
| Umbral de interferencia del sensor (dBW) | -163 | -163 |
| Ganancia de antena (dBi) | 45 | 45 |
| Apertura efectiva (dB/m ²) | -63 | -67 |
| Factor para múltiples sistemas OSG (dB) | 3,0 | 3,0 |
| Umbral de dfp (dB(W/(m ² · 200 MHz))) | -148 | -144 |

4.1.6 Sumario de compatibilidad en los sensores de LEO

La compatibilidad se determina comparando las restricciones operacionales evaluadas anteriormente con ejemplos de sistemas previstos u operacionales en esta u otras bandas. Estos sistemas se describen en el § 2. Pueden extraerse las siguientes conclusiones del análisis y la comparación con otros sistemas.

- Los transmisores EES pueden producir interferencia superior al umbral del sensor cuando se produce acoplamiento de antena próximo al haz principal. Los niveles de potencia de interferencia pueden estar por debajo del umbral en otras orientaciones.
- De los ejemplos de transmisores EES que rebasan el umbral, menos de ocho pueden estar en órbitas por debajo del sensor sin rebasar el criterio temporal de la compartición.
- Aunque una ganancia de antena de calibración inferior reduce el potencial de interferencia a sensores pasivos en el modo calibración, la ganancia no puede reducirse suficientemente para permitir enlaces EES con distancias de enlaces de alcance razonablemente largo determinadas por comparación de las restricciones calculadas con sistemas típicos previstos o en funcionamiento en otras bandas.
- Restringir el ángulo con respecto al nadir cuando la antena de calibración del sensor está apuntada también reduce la interferencia procedente de enlaces EES en ciertas órbitas, pero las restricciones no están dentro de la gama de funcionamiento de los sensores ya instalados, y puede no ser viable.
- Una separación más reducida del vehículo espacial con los EES puede reducir la posibilidad de interferencia, pero los ángulos geocéntricos máximos permisibles pueden no ser viables en los sistemas de satélites de comunicaciones.
- El sensor de barrido transversal tiene menos restricciones de su antena de calibración que el sensor AMSU, pero la capacidad adicional no parece que mejore significativamente su inmunidad a la interferencia producida por los EES.
- Los EES OSG pueden tener compartición con sensores a condición de que su dfp en la órbita del sensor no sobrepase ciertos límites.

La conclusión general de este punto es que las restricciones del sensor o de los parámetros del EES que serían necesarios para proporcionar protección adecuada pueden ser demasiado restrictivas para los sistemas típicos que podrían planificarse o implementarse.

4.2 Interferencia causada a los sensores en órbita geoestacionaria

4.2.1 Identificación de las situaciones de interferencia

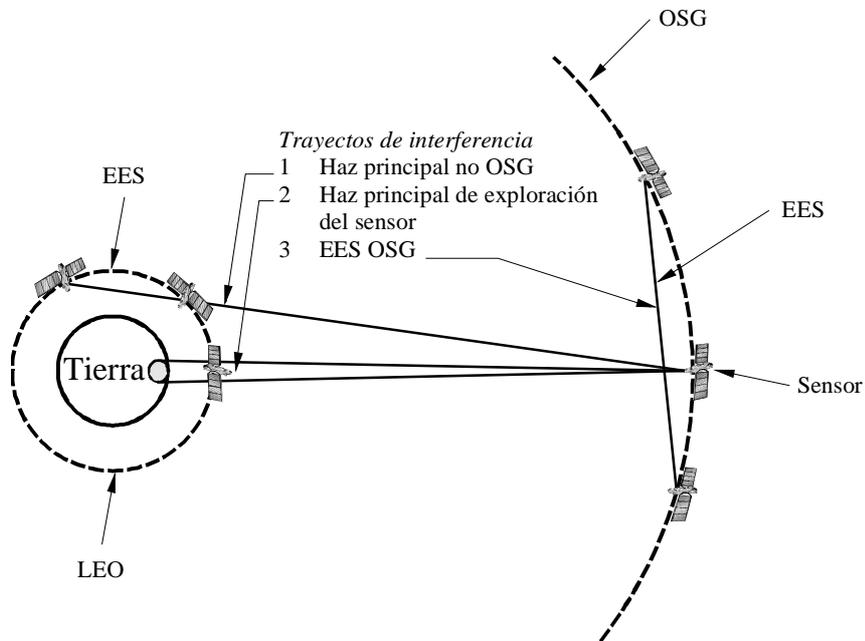
Los sensores en órbita geoestacionaria funcionarán con un tipo de exploración de antena que barrerá la porción visible de la Tierra hasta unos $\pm 8^\circ$ con respecto al nadir del vehículo espacial. Si este sensor utiliza espacio frío para la calibración, podría apuntar su antena de exploración fuera de la Tierra análogamente al AMSU o bien tener una antena separada para calibración apuntada a cualquier emplazamiento conveniente. La antena de calibración en frío no sólo debe evitar la Tierra sino el Sol, y preferentemente la Luna. El sensor AMSU en órbita heliosíncrona puede calibrar en el mismo emplazamiento con respecto al vehículo espacial y evitar siempre apuntar al Sol. Si el satélite OSG apunta a cualquier emplazamiento dentro de su plano orbital, es probable que apunte en cualquier momento al Sol o a la Luna y perturbe la medición en frío. Se supone por tanto que el satélite OSG apuntaría a la antena de calibración en frío en alguna dirección que no haga que la antena apunte a las proximidades del Sol, de la Tierra o de la Luna. La mayoría del aislamiento para la antena de calibración se produciría si está apuntada sea al norte o al sur a 90° del plano ecuatorial. Esto apunta la antena de calibración al menos 67° con respecto a la eclíptica, en la que la ganancia direccional sería relativamente baja.

Como se ha señalado, la antena de calibración apuntaría probablemente lejos de la Tierra y lejos del plano orbital geoestacionario. Como la interferencia se debe predominantemente al acoplamiento próximo al haz principal, la antena de calibración es improbable que reciba interferencia excesiva. Los modos de interferencia que probablemente afectarían al sensor del satélite OSG serían:

- 1 En la antena orientada a la Tierra en el modo exploración, interferencia causada por el haz principal de los satélites en órbitas más bajas.
- 2 En la antena orientada a la Tierra en el modo exploración, interferencia causada por lóbulos laterales de satélites de órbitas bajas.
- 3 En el sensor en cualquiera de ambos modos, interferencia causada por enlaces EES de satélites en la órbita geoestacionaria.

La Fig. 17 ilustra los tres modos posibles.

FIGURA 17
Modos de interferencia causada a sensores en la órbita geostacionaria



1416-17

4.2.2 Análisis estático de interferencia producida por EES no OSG

Análisis anteriores de sensores en órbitas bajas indicaron que las potencias de interferencia más altas se produjeron cuando el haz principal del sensor o del transmisor no OSG apuntaba directamente al otro satélite. Estos alineamientos se ilustran como trayectos de interferencia 1 y 2 en la Fig. 17. Estos dos trayectos se investigarán juntos determinando primero la sensibilidad umbral del sensor hacia el emplazamiento del transmisor no OSG.

Los nueve sistemas presentados en el Cuadro 10 se evaluarán como si fuesen sistemas que funcionan en estas bandas. La potencia del transmisor para cada enlace se determinó utilizando la ecuación (2) y la separación angular del Cuadro 10. Se supuso una antena de 45 dBi para cada enlace. En cada trayecto de interferencia, se supuso que se radiaba la potencia más la ganancia de antena total de 45 dBi desde un punto con una separación de 90° con respecto al punto subsatélite del sensor. En el trayecto de interferencia 2, se supuso una ganancia de lóbulo posterior de -10 dBi con el transmisor no OSG a una altitud por encima del punto subsatélite. Se calculó la sensibilidad del sensor hacia el trayecto de interferencia 1 suponiendo que el sensor estaba explorando +8° en esa dirección. Se supuso una ganancia de antena del sensor de 20 dBi (la sensibilidad direccional es -183 dBW). Hacia el punto subsatélite se supuso el sensor apuntado al nadir y la ganancia de 66 dBi completa de la antena del sensor se añade a su sensibilidad (-226 dBW).

El Cuadro 10 muestra los resultados de estos cálculos y la comparación con la sensibilidad de la OSG. Las cuatro primeras columnas dan los parámetros de estos sistemas. Las cuatro columnas siguientes dan el nivel de potencia (dBW por 200 MHz) en la OSG para estos sistemas. En las dos últimas columnas estos niveles de potencia se comparan con los niveles de sensibilidad umbral del sensor hacia su dirección.

CUADRO 10

Determinación de la compatibilidad entre el sensor OSG y los EES no OSG

| Sistema | Número de satélites | Grados de separación | Altitud orbital (km) | Potencia en la OSG debida a emisiones de lóbulos laterales (dBW) | | Potencia en la OSG debida a emisiones del lóbulo principal (dBW) | | ¿Compartición con el sensor OSG debido a emisiones de lóbulos laterales? | ¿Compartición con el sensor OSG debido a emisiones de lóbulo principal? |
|-----------|---------------------|----------------------|----------------------|--|---------|--|---------|--|---|
| | | | | 118 GHz | 183 GHz | 118 GHz | 183 GHz | | |
| Sistema A | 66 | 32,7 | 780 | -218,0 | -212,4 | -160,9 | -159,1 | No | No |
| Sistema B | 12 | 90 | 10 350 | -205,2 | -188,6 | -151,4 | -149,7 | No | No |
| Sistema C | 48 | 60 | 1 414 | -213,3 | -207,7 | -156,4 | -154,7 | No | No |
| Sistema D | 32 | 45 | 775 | -215,6 | -210,1 | -158,6 | -156,8 | No | No |
| Sistema E | 840 | 17,1 | 700 | -223,3 | -217,8 | -166,2 | -164,5 | No | No |
| Sistema F | 48 | 45 | 950 | -215,5 | -209,9 | -158,5 | -156,7 | No | No |
| Sistema G | 24 | 60 | 800 | -213,9 | -208,3 | -156,8 | -155,0 | No | No |
| Sistema H | 10 | 72 | 500 | -213,3 | -207,7 | -156,2 | -154,4 | No | No |
| Sistema I | 24 | 60 | 1 000 | -213,7 | -208,1 | -156,7 | -154,9 | No | No |

En todos los casos de los sistemas no OSG examinados, la interferencia rebasó el umbral de interferencia asignado al sensor.

4.2.3 Análisis temporal de la interferencia no OSG

Se ha establecido ya que un único transmisor EES puede transmitir niveles de potencia interferentes en el haz principal del sensor aun si se trata de lóbulos laterales alejados de la antena EES. Por tanto, cualquier EES que atravesase el haz principal del sensor puede causar interferencia.

El sensor pasivo propuesto tiene una huella de 2 000 km² sobre la Tierra y una huella del mismo tamaño a altitudes orbitales más bajas. Suponiendo una altitud nominal de 800 km, la relación de superficie esfera completa/huella del satélite es de 0,0036%. Si los satélites estuvieran distribuidos uniformemente, tendría que haber 323 733 satélites para que haya uno en el campo de visión del sensor en todo momento. Para reducir eso a un satélite en el campo de visión del sensor durante menos del 0,01%, tendría que haber menos de 33 satélites en LEO funcionando en cualquier banda de 200 MHz.

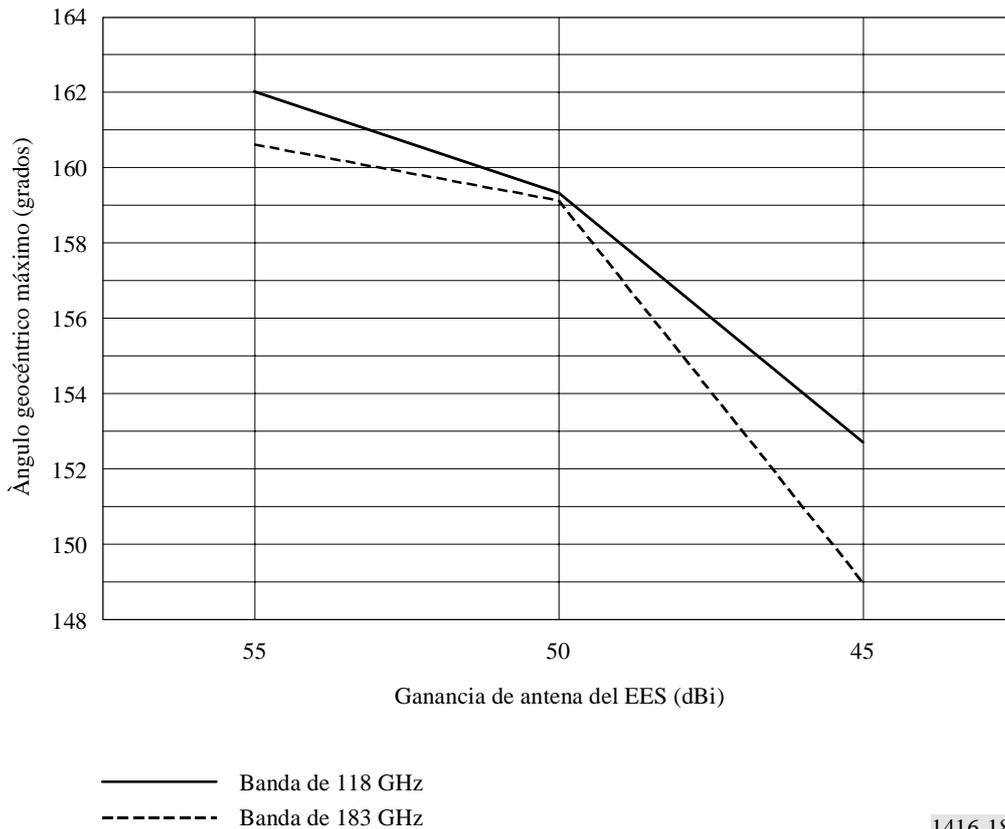
4.2.4 Interferencia producida por otros EES OSG

La interferencia producida por otros satélites OSG se designa como trayecto de interferencia 3. En este caso ni el haz principal del satélite activo ni el sensor pasivo se apuntan directamente entre sí a menos que el sensor esté colineado con el receptor deseado. La relación posicional entre los satélites no cambiará con el tiempo para estos satélites. La compartición es posible si la ganancia fuera del haz principal del transmisor EES es suficientemente baja para evitar niveles de señal interferentes en el sensor. Esto es controlado por el diagrama de ganancia de la antena de transmisión del EES, el ángulo geocéntrico del enlace EES y el ángulo geocéntrico entre el sensor y el transmisor EES.

Para determinar si cualquier enlace EES podría tener interferencia con el sensor, se investigaron enlaces con ganancias de antena de 60 dBi a 45 dBi. El ángulo geocéntrico se varió en ángulos de hasta 162,2° para determinar cuándo se produciría interferencia. En el caso de una antena de 60 dBi, no hubo niveles de interferencia que rebasasen el umbral. El nivel de interferencia sólo rebasó el umbral con una separación amplia para las antenas de ganancias 55 dBi, 50 dBi, 45 dBi. La Fig. 18 muestra la separación máxima que evita interferencia al sensor por encima del umbral.

Los EES en los sistemas de la órbita geoestacionaria pueden tener compartición con sensores en órbita geoestacionaria a condición de que el ángulo geocéntrico máximo con relación a la ganancia de antena no rebase los valores representados en la Fig. 18.

FIGURA 18
Ángulo geocéntrico máximo admisible para EES OSG



1416-18

4.2.5 Comparación y conclusiones sobre la compartición con sensores en órbita geoestacionaria

- Los sensores en órbita geoestacionaria pueden recibir niveles de potencia por encima del umbral de EES de LEO cuando se produce acoplamiento de antena próximo al haz principal.
- Todos los ejemplos de sistemas LEO que se examinaron causarían interferencia a un sensor en órbita geoestacionaria si se instala en estas bandas.
- Las constelaciones en LEO con 33 o menos EES en esta banda podrían funcionar sin infringir el criterio temporal para la compartición.
- Todos los EES OSG muy largos, salvo unos pocos, pueden tener compartición con sensores en órbita geoestacionaria sin rebasar el umbral de interferencia en ningún momento. Todos los sistemas previstos o en explotación en otras bandas podrían tener compartición si se implementasen en esta banda.

5 Conclusiones

5.1 Compartición en la banda de frecuencias 116-126 GHz

La compartición con el SES en la gama de frecuencias entre 116 y 126 GHz no es realizable, salvo en EES de la OSG. El análisis ha demostrado que es probable que no sean prácticos EES no OSG que no rebasen el umbral de interferencia del sensor en los aspectos de longitud del trayecto y número admisible de circuitos, si se comparan con los ejemplos de sistemas previstos o implementados en otras bandas. Los sistemas entre satélites en la órbita geoestacionaria pueden tener compartición con los sensores a condición de que su potencia a la altura orbital del sensor de 1 000 km se limite a:

$$-148 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot 200 \text{ MHz))}$$

5.2 Compartición en las bandas de frecuencias comprendidas entre 174,5 y 190 GHz

Tampoco es viable la compartición con el SES en las bandas de frecuencias comprendidas entre 174,5 y 190 GHz, salvo en los EES de la órbita geoestacionaria. Los sistemas entre satélites de la órbita geoestacionaria pueden tener compartición con los sensores a condición de que su potencia a la altitud orbital del sensor de 1 000 km se limite a:

$$-144 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot 200 \text{ MHz))}$$

5.3 Restricción de las técnicas de los sensores para facilitar la compartición

Es improbable que pueda conseguirse una protección adecuada de los sensores pasivos ajustando o restringiendo las técnicas de medición de los sensores pasivos.
