

RECOMENDACIÓN UIT-R SA.1280*

**SELECCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE EMISIÓN DE LOS SENSORES ACTIVOS
A BORDO DE VEHÍCULOS ESPACIALES PARA REDUCIR LA POSIBLE
INTERFERENCIA CAUSADA A RADARES TERRENALES QUE
FUNCIONAN EN LAS BANDAS DE FRECUENCIAS 1-10 GHz**

(Cuestión UIT-R 213/7)

(1997)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que los sensores activos a bordo de vehículos espaciales pueden funcionar en bandas de frecuencias comunes con sistemas de radiolocalización y radionavegación;
- b) que los sensores activos a bordo de vehículos espaciales pueden tener características técnicas que producen interferencias inaceptables a radares terrenales que funcionan en las bandas de frecuencias entre 1 y 10 GHz;
- c) que la experiencia habida en materia de compartición de bandas durante los últimos 20 años es que no se ha producido interferencia perjudicial;
- d) que algunos radares terrenales están diseñados para proporcionar un volumen de ganancia de procesamiento con respecto a determinados tipos de interferencias en forma de impulsos;
- e) que puede desconocerse el valor exacto de la ganancia de procesamiento de un radar terrenal con respecto a un tipo particular de interferencia en forma de impulsos;
- f) que pueden adaptarse algunas características técnicas de los sensores a bordo de vehículos espaciales para mejorar la compatibilidad con radares terrenales, pero que esta flexibilidad está limitada por los requisitos de calidad de funcionamiento de los sensores,

recomienda

- 1 que, para mejorar las características de emisión de los sensores activos a bordo de vehículos espaciales y mejorar la compatibilidad con radares terrenales que funcionan en bandas de frecuencias comunes, se pueda utilizar la metodología que figura en el Anexo 1;
- 2 que cuando se han establecido criterios de interferencia o compartición específicos para una banda de frecuencias, se utilicen éstos en lugar de los criterios genéricos indicados en el Anexo 1.

* Esta Recomendación fue elaborada de manera conjunta por las Comisiones de Estudio 7 y 8 de Radiocomunicaciones y sus futuras revisiones deberán ser realizadas también conjuntamente por dichas Comisiones de Estudio.

ANEXO 1

1 Introducción

Se presenta una metodología que permite calcular si la señal no deseada recibida por un radar terrenal desde un sensor activo a bordo de un vehículo espacial puede o no causar dificultades cuando funciona en bandas de frecuencias comunes. Los cálculos ponen de relieve un cierto número de parámetros del sensor que pueden elegirse y mejorar la situación de compartición.

Las bandas de frecuencias inferiores a 10 GHz consideradas por esta metodología son 1 215-1 300 MHz, 3 100-3 300 MHz, 5 250-5 350 MHz, 8 550-8 650 MHz y 9 500-9 800 MHz. Los operadores de radar suelen denominarlas banda L, banda S, banda C y banda X (las dos últimas). Las características de estas diversas bandas son tales que las bandas L y S suelen utilizarse para radares de búsqueda y vigilancia, en tanto que las bandas C y X para radares de seguimiento.

2 Cálculo de la interferencia causada a radares terrenales

El nivel de potencia medio de la señal interferente, I (dBW), recibido por un radar terrenal desde un vehículo espacial se calcula como sigue:

$$I = 10 \log P_t + 10 \log (\tau PRF) + G_t + G_r - (32,44 + 20 \log (fR)) + OTR - PG \quad (1)$$

donde:

- P_t : potencia de cresta del transmisor del sensor a bordo del vehículo espacial (W)
- τ : anchura del impulso del sensor a bordo del vehículo espacial (s)
- PRF : frecuencia de repetición del impulso del sensor a bordo del vehículo espacial (Hz)
- G_t : ganancia de antena del sensor a bordo del vehículo espacial hacia el radar terrenal (dBi)
- G_r : ganancia de antena del radar terrenal hacia el sensor a bordo del vehículo espacial (dBi)
- f : frecuencia (MHz)
- R : distancia oblicua entre sensor y radar (km)
- OTR : rechazo en sintonía del receptor del radar (dB)
- PG : ganancia de procesamiento (dB), rechazo de señales no deseadas debido al procesamiento de la señal del receptor de radar (si no se conoce, se supone que su valor es 0).

La ecuación (1) proporciona el nivel de potencia medio de la señal interferente. Éste se utiliza cuando puede determinarse que su utilización es adecuada. (Por ejemplo, un radar que produce una transformada rápida de Fourier en la señal recibida provocará la borrosidad de la señal pulsante disímil a través de un cierto número de impulsos, dando como resultado un nivel medio de la señal interferente.) El término rechazo en sintonía se calcula del modo siguiente:

$$OTR = 10 \log (B_r/B_t) \quad \text{para } B_r \leq B_t \quad (2a)$$

$$= 0 \quad \text{para } B_r > B_t \quad (2b)$$

donde:

- B_r : anchura de banda del receptor
- B_t : anchura de banda de la señal interferente transmitida.

Si el valor de cresta de la señal interferente es importante, se debe omitir el segundo término de la ecuación (1), y el rechazo en sintonía se calcula como sigue:

Impulso de la señal de entrada sin modulación de frecuencia:

$$OTR = 20 \log (B_r \tau) \quad \text{para } B_r \tau < 1 \quad (3a)$$

$$= 0 \quad \text{para } B_r \tau > 1 \quad (3b)$$

Impulso de la señal de entrada con modulación de frecuencia:

$$OTR = 10 \log \left(\frac{B_r^2 \tau}{B_c} \right) \quad \text{para } \frac{B_r^2 \tau}{B_c} < 1 \quad (4a)$$

$$= 0 \quad \text{para } \frac{B_r^2 \tau}{B_c} > 1 \quad (4b)$$

donde:

B_r : anchura de banda de la frecuencia intermedia (FI) del radar terrenal

B_c : anchura de banda de la señal de chirrido del sensor a bordo del vehículo espacial

τ : anchura del impulso del sensor.

3 Criterios de interferencia aplicables a radares terrenales

Los criterios de interferencia generales aplicables a radares terrenales se han postulado sobre la base de un trabajo preliminar del Grupo de Trabajo Mixto 7-8R; si existen, deben utilizarse criterios específicos para determinados sistemas o bandas de frecuencias.

3.1 Radares de vigilancia

Se supone que la relación señal/ruido recibida de los radares de vigilancia no puede estar degradada en más de 0,5 dB en un tiempo mayor al tiempo de exploración, tomado en 10 s. Esto equivale a una relación de potencia interferencia/ruido de -9 dB en la etapa de FI del receptor. En el caso de los radares de vigilancia, el nivel de potencia medio de la señal interferente se considera importante.

3.2 Radares de seguimiento

Los radares de seguimiento suelen utilizar «ventanas de distancia» para excluir todos los retornos distintos a los de determinadas distancias de interés. Una consideración importante al determinar la susceptibilidad de un radar de seguimiento a un tren de impulsos interferentes es la fracción de impulsos interferentes que coinciden con las ventanas de distancia. La coincidencia de los impulsos interferentes con las ventanas de distancia dependerá de que las frecuencias de repetición de impulsos deseadas y no deseadas estén relacionadas (Caso I) o no (Caso II) con múltiplos enteros. La fracción de impulsos coincidentes, f_c , se calcula como sigue:

$$f_c = \frac{GCF (PRF_i, PRF_g)}{PRF_g} \quad \text{para el Caso I} \quad (5a)$$

$$f_c = PRF_i (\tau_g + \tau_i) \quad \text{para el Caso II} \quad (5b)$$

donde:

PRF_i : frecuencia de repetición del impulso interferente

PRF_g : frecuencia de repetición de la ventana

$GCF (PRF_i, PRF_g)$: factor común mayor de PRF_i y PRF_g

τ_i : anchura del impulso interferente

τ_g : anchura de la ventana.

Obsérvese que cuando $\tau_i > \tau_g$ y las PRF deseadas y no deseadas no están relacionadas con múltiplos enteros (Caso II), f_c es aproximadamente el ciclo de trabajo de los impulsos interferentes. Se considera que esta situación corresponde al caso típico, y se utiliza en la siguiente determinación del umbral de degradación para un radar de seguimiento.

Para obtener datos de posición sumamente precisos sobre objetos de interés, los radares de seguimiento utilizan antenas de ganancia alta con haces principales estrechos y bien definidos. Un servomecanismo intenta mantener el eje de puntería del haz principal de antena en el blanco; el servomecanismo es impulsado por una señal de error generada por el error de ángulo entre el blanco y el eje de puntería de la antena. Las señales no deseadas que entran en el radar pueden aumentar este error sistemático.

Un umbral de degradación para un radar de seguimiento, expresado como una fracción permitida de impulsos interferentes coincidentes, f_c , en función de la relación señal/interferencia en la señal de salida FI, se expresa como:

$$f_c = \frac{a^2 - 1}{\frac{90B_r \tau}{(S/I - 1)} - 1} \quad \text{para } S/I > 1 \quad (6a)$$

$$f_c = \frac{a^2 - 1}{\frac{90B_r \tau}{(I/S - 1)} - 1} \quad \text{para } S/I < 1 \quad (6b)$$

donde:

a : factor asociado con el error de seguimiento total, con degradación debida a la interferencia incluida (por ejemplo, $a = 1,1$ permite un incremento de 0,1 o del 10% debido a la interferencia)

B_r : anchura de banda de 3 dB del filtro de FI del radar

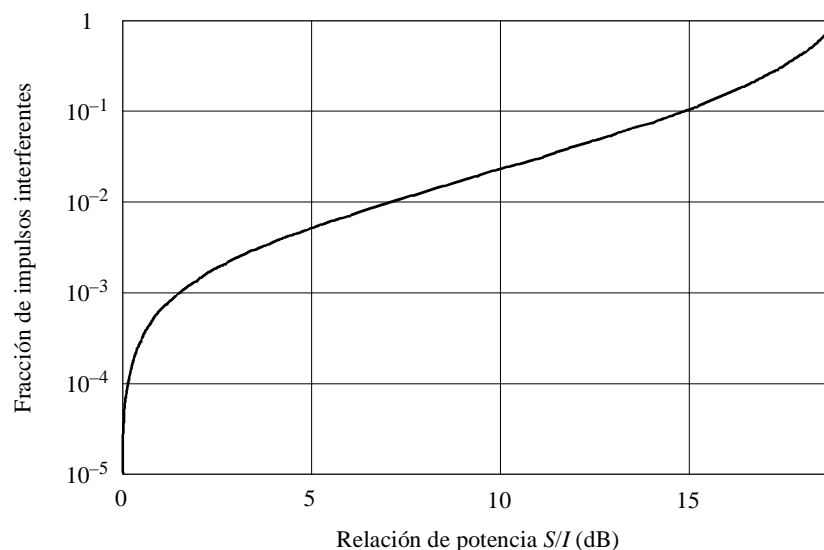
τ : longitud de los impulsos del blanco (obsérvese que $B_r \tau \cong 1$ para un radar de seguimiento)

S/I : relación de potencia señal/interferencia en la señal de salida de FI del radar (no en dB).

La Fig. 1 es una representación de la fracción de impulsos coincidentes en función de la relación S/I de la señal de salida de FI del radar, que permite un aumento del 10% en el error de seguimiento del radar debido a la interferencia. La fracción de impulsos coincidentes es aproximadamente el ciclo de trabajo del sensor (6%), de modo que una relación S/I de 13 dB corresponde a un error de seguimiento del 10%. Se supone que la relación S/I debe ser ≥ 13 dB para periodos de tiempo mayores de 3 s. (Dado que se han elaborado criterios de interferencia basados en un impulso interferente que coincide con la compuerta de intervalo del radar, debe utilizarse la potencia de cresta de la señal interferente.)

FIGURA 1

Relación S/I del radar en función de la fracción de impulsos interferentes coincidentes (aumento del 10% en el error de seguimiento)



4 Análisis de un ejemplo de señal no deseada desde un sensor a bordo de un vehículo espacial a radares terrenales

4.1 Características técnicas

4.1.1 Sensor a bordo del vehículo espacial

En el Cuadro 1 figuran las características técnicas del sensor a bordo del vehículo espacial representativo utilizado en los análisis siguientes. En los Cuadros 2, 3, 4 y 5 se indican las características de ganancia de antena del sensor a bordo del vehículo espacial.

CUADRO 1

Características del radar de apertura sintética del vehículo espacial

Parámetro	Valor
Altura de la órbita (km)	400
Inclinación de la órbita (grados)	57
Potencia de transmisión (W)	1 500
Anchura del impulso (μs)	33,8
Frecuencia de repetición del impulso del sensor a bordo del vehículo espacial (Hz)	1 736
Ciclo de trabajo	0,059
Modulación del impulso	MF lineal
Anchura de banda de la frecuencia de repetición (MHz)	10

CUADRO 2

Diagrama de ganancia de antena del radar de apertura sintética a bordo del vehículo espacial a 1 240 MHz

Diagrama	Ganancia $G(\theta)$ (dBi) en función del ángulo fuera del eje θ (grados)	Gama angular
Vertical (elevación)	$G_v(\theta_v) = 36,4 - 0,478(\theta_v)^2$ $G_v(\theta_v) = 33,8 - 1,0 \theta_v$ $G_v(\theta_v) = -11$	$0^\circ < \theta_v < 3,6^\circ$ $3,6^\circ < \theta_v < 45^\circ$ $\theta_v > 45^\circ$
Horizontal (azimut)	$G_h(\theta_h) = 0,0 - 19,6(\theta_h)^2$ $G_h(\theta_h) = -24,5 - 0,47 \theta_h$ $G_h(\theta_h) = -30,5$	$0^\circ < \theta_h < 1,13^\circ$ $1,13^\circ < \theta_h < 12,7^\circ$ $\theta_h > 12,7^\circ$
Diagrama del haz	$G(\theta) = \{G_v(\theta_v) + G_h(\theta_h), -11\}$ máx	

CUADRO 3

Diagrama de ganancia de antena del radar de apertura sintética a bordo del vehículo espacial a 3 200 MHz

Diagrama	Ganancia $G(\theta)$ (dBi) en función del ángulo fuera del nadir (grados)	Gama angular
Elevación	$G_{el}(\theta_{el}) = 39,7 - 0,397(\theta_{el})^2$ $G_{el}(\theta_{el}) = 19,7$ $G_{el}(\theta_{el}) = 4,7$ $G_{el}(\theta_{el}) = 17,7$	$0^\circ < \theta_{el} < 7,1^\circ$ $7,1^\circ < \theta_{el} \leq 30^\circ$ $30^\circ < \theta_{el} \leq 60^\circ$ $60^\circ < \theta_{el} \leq 90^\circ$
Azimut	$G_{az}(\theta_{az}) = 0,0 - 68,0(\theta_{az})^2$ $G_{az}(\theta_{az}) = -12,0$ $G_{az}(\theta_{az}) = 0,0 - 9,0(\theta_{az})$ $G_{az}(\theta_{az}) = -35,0$	$0^\circ < \theta_{az} < 0,42^\circ$ $0,42^\circ < \theta_{az} \leq 1,32^\circ$ $1,32^\circ < \theta_{az} \leq 3,9^\circ$ $\theta_{az} > 3,9^\circ$
Diagrama del haz	$G(\theta) = \{G_{el}(\theta_{el}) + G_{az}(\theta_{az}), -8\}$ máx	

CUADRO 4

**Diagrama de ganancia de antena del radar de abertura sintética
a bordo del vehículo espacial a 5 300 MHz**

Diagrama	Ganancia $G(\theta)$ (dBi) en función del ángulo fuera del eje θ (grados)	Gama angular
Vertical (elevación)	$G_v(\theta_v) = 42,7 - 0,478(\theta_v)^2$ $G_v(\theta_v) = 40,1 - 1,0 \theta_v$ $G_v(\theta_v) = -5$	$0^\circ < \theta_v < 3,6^\circ$ $3,6^\circ < \theta_v < 45^\circ$ $\theta_v > 45^\circ$
Horizontal (azimut)	$G_h(\theta_h) = 0,0 - 442(\theta_h)^2$ $G_h(\theta_h) = -25,0 - 2,2 \theta_h$ $G_h(\theta_h) = -31$	$0^\circ < \theta_h < 0,24^\circ$ $0,24^\circ < \theta_h < 2,7^\circ$ $\theta_h > 2,7^\circ$
Diagrama del haz	$G(\theta) = \{G_v(\theta_v) + G_h(\theta_h), -5\}$ máx	

CUADRO 5

**Diagrama de ganancia de antena del radar de abertura sintética
a bordo del vehículo espacial a 8 600 y 9 650 MHz**

Diagrama	Ganancia $G(\theta)$ (dBi) en función del ángulo fuera del eje θ (grados)	Gama angular
Vertical (elevación)	$G_v(\theta_v) = 44,0 - 0,397(\theta_v)^2$ $G_v(\theta_v) = 24,5$ $G_v(\theta_v) = 9,5$ $G_v(\theta_v) = 22,5$	$\theta_v < 7,1^\circ$ $7,1^\circ < \theta_v < 30^\circ$ $30^\circ < \theta_v < 60^\circ$ $\theta_v > 60^\circ$
Horizontal (azimut)	$G_h(\theta_h) = 0 - 612,2(\theta_h)^2$ $G_h(\theta_h) = -12$ $G_h(\theta_h) = 0 - 27,0 \text{ dB } (\theta_h)$ $G_h(\theta_h) = -35$	$\theta_h < 0,14^\circ$ $0,14^\circ < \theta_h < 0,44^\circ$ $0,44^\circ < \theta_h < 1,3^\circ$ $\theta_h > 1,3^\circ$
Diagrama del haz	$G(\theta) = \{G_v(\theta_v) + G_h(\theta_h), -3\}$ mín	

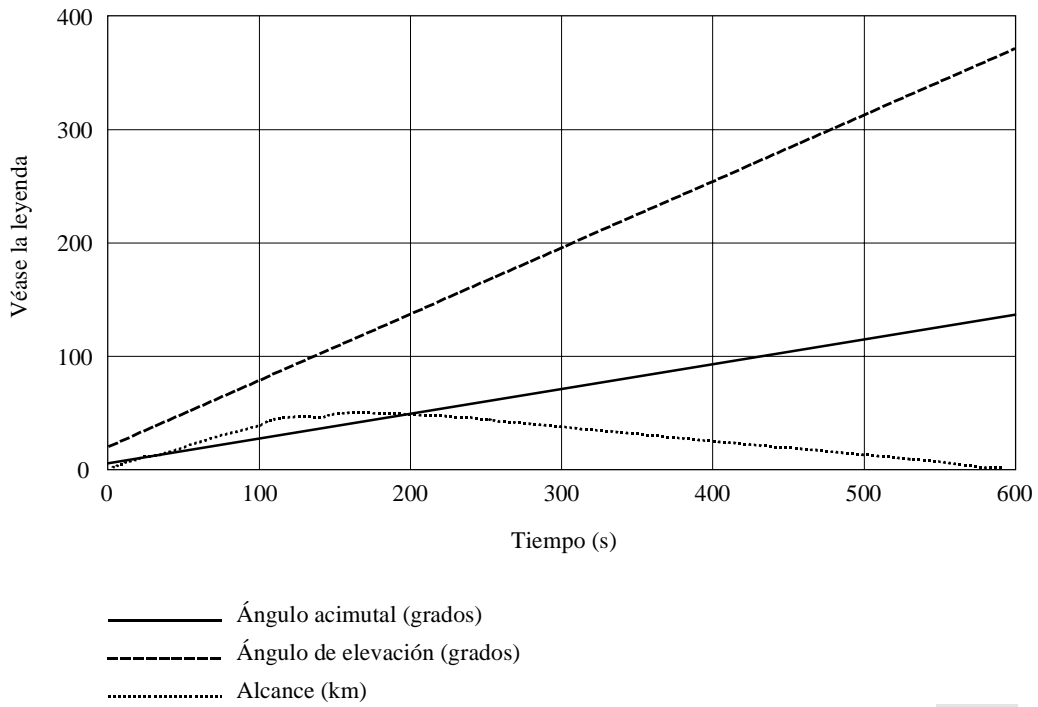
4.1.2 Radares terrenales

En los cálculos para los radares de vigilancia se utiliza un nivel de lóbulo lateral de $-5,38$ dBi (que corresponde a la ganancia mínima para un diagrama de antena de ganancia de 38 dBi) ya que las conjunciones del haz principal son raras y muy breves debido a sus características de exploración. El acoplamiento del haz principal es más probable en el caso de los radares de seguimiento, que pueden apuntar en una dirección específica durante largos periodos; para los radares de seguimiento se utiliza un diagrama de antena parabólica de alta ganancia (47 dBi). Para ambos casos, se supone una anchura de banda de FI de 1 MHz y un factor de ruido de 5 dB.

4.2 Método de análisis y resultados

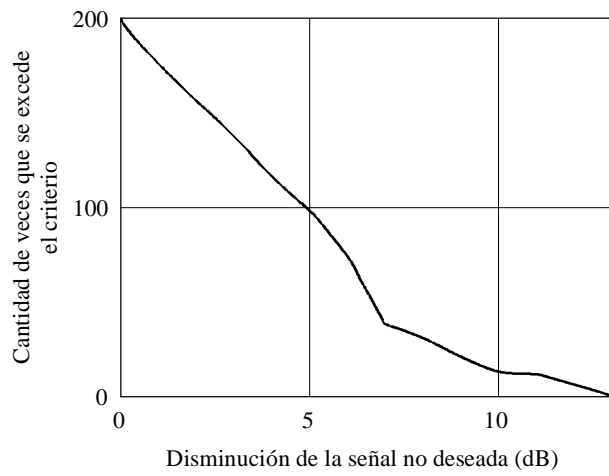
Se efectuó una simulación de 1 500 órbitas del sensor a bordo del vehículo espacial. En la Fig. 2 se indica el evento de seguimiento –repetido durante toda la simulación– supuesto para los radares de seguimiento (banda C y banda X). (Se utiliza un blanco con una sección transversal de radar de 5 dB/m².) Se calculó la señal no deseada recibida durante todo el periodo simulado, y se comparó con los criterios. Se supuso que la ganancia de procesamiento, definida en la ecuación (1), era igual a 0. Si se excedían los criterios, se iniciaba un nuevo ciclo de simulación con una reducción incremental en la potencia de la señal no deseada recibida. Esto se repitió hasta que no se excedieran los criterios. En las Figs. 3 a 6 siguientes se muestran los resultados para el sensor del Cuadro 1.

FIGURA 2
Evento de seguimiento supuesto para el radar de seguimiento terrenal



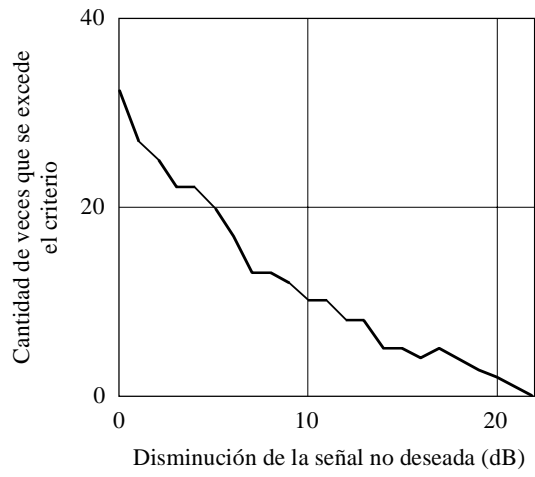
1280-02

FIGURA 3
Radar en banda L (1 240 MHz)



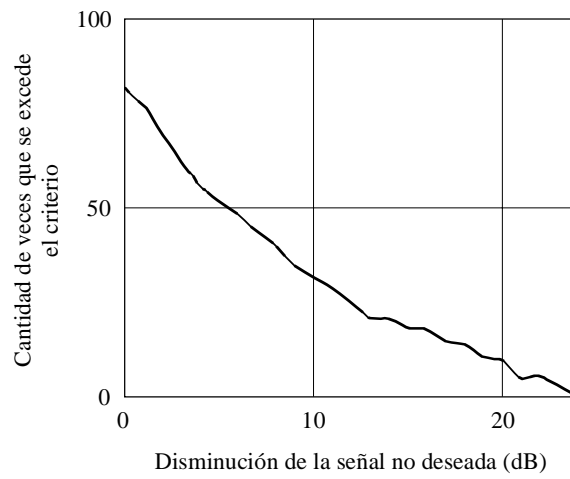
1280-03

FIGURA 4
Radar en banda S (3 200 MHz)



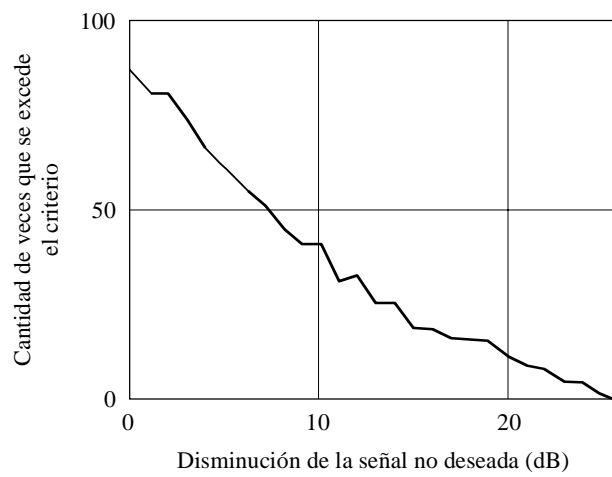
1280-04

FIGURA 5
Radar en banda C (5 300 MHz)



1280-05

FIGURA 6
Radar en banda X (8 600 MHz)



1280-06

5 Discusión de los resultados sobre el análisis del ejemplo

Según las Figs. 2 a 6, puede comprobarse que, independientemente de que se hayan considerado radares de seguimiento o radares de vigilancia, el sensor del Cuadro 1 puede causar un número significativo de eventos de interferencias. Sin embargo, una disminución en el nivel de potencia de la señal no deseada recibida por los radares terrenales puede mejorar en forma espectacular la situación. Una reducción de alrededor de 13 y 20 dB, para los radares de vigilancia y de seguimiento, respectivamente, puede reducir los posibles eventos de interferencias a un número suficientemente pequeño que probablemente resulte aceptable.

6 Procedimiento para utilizar la metodología

Durante las etapas de diseño debe examinarse la potencia de cresta o potencia media de un sensor activo a bordo de un vehículo espacial. Si no está por debajo de la gama de 13 a 20 dB del sensor del ejemplo del Cuadro 1, es posible (véase la Nota 1) que cause una interferencia inaceptable en un radar terrenal de vigilancia o seguimiento, respectivamente. Pueden examinarse las ecuaciones (1) a (4) para determinar los parámetros que pueden ajustarse potencialmente durante el diseño del sensor a bordo del vehículo espacial, a fin de mejorar la compartición con los radares terrenales. La potencia del transmisor, la ganancia de antena (en particular, los niveles del lóbulo lateral), la anchura del impulso y la frecuencia de repetición, así como la anchura de banda de la señal de chirrido son parámetros cuyo ajuste es posible.

NOTA 1 – Cuando se analiza la compatibilidad entre un sensor a bordo de un vehículo espacial y un determinado radar terrenal, debe considerarse si existe, la ganancia de procesamiento del radar terrenal ya que el análisis supone que no había ninguno. Esta suposición es válida para el caso general ya que no todos los radares tienen ganancia de procesamiento. Si todos los radares situados dentro de una banda tienen la misma ganancia de procesamiento será necesario determinar un solo valor.

Considérense, por ejemplo, dos radares que funcionan en 9 500-9 800 MHz:

- un radar de seguimiento con una anchura de banda de FI de 1 MHz (radar 1),
- un radar de avión para interceptación con una anchura de banda FI de 5 MHz (radar 2).

Si el sensor a bordo del vehículo espacial del Cuadro 1 puede funcionar con una anchura de impulso y una anchura de banda de la señal de chirrido distintas como en el Cuadro 6, puede lograrse una reducción significativa en el nivel de potencia de la señal no deseada. La reducción en el nivel de potencia de la señal no deseada obtenida en este ejemplo es del orden de la reducción necesaria para alcanzar la situación de compartición mejorada deseada.

CUADRO 6

Ejemplo de reducción en la potencia del sensor de la señal no deseada recibida, a través de cambios en la anchura de impulso del sensor y la anchura de banda de la señal de chirrido

	Nuevos valores de parámetros		ΔOTR (dB)	ΔP_{avg} (dB)	ΔI (dB)
	τ (μs)	B_c (MHz)			
Radar 1	3	280	-19,7	No disponible ⁽¹⁾	-19,7
Radar 2	3	280	-5,7	-10,5	-16,2

⁽¹⁾ Se estima conveniente utilizar la potencia media de la señal de interferencia para el radar de avión, y la potencia de cresta de la señal de interferencia para el radar de seguimiento.

7 Conclusiones

Se ha demostrado que debe ser posible cumplir los criterios de protección aplicables a los radares terrenales mediante la selección de parámetros del sensor activo a bordo de un vehículo espacial teniendo en cuenta estos objetivos. La potencia del transmisor del sensor, el diagrama de ganancia de antena, la anchura de los impulsos, la frecuencia de repetición de los impulsos, y la anchura de banda de la señal de chirrido (si se utiliza modulación de frecuencia) constituyen posibles características que pueden ajustarse para mejorar la compatibilidad.