

Recomendación UIT-R RS.1166-5

(12/2023)

Serie RS: Sistemas de detección a distancia

Criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia para sensores activos a bordo de vehículos espaciales



Prólogo

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

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

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

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

Series de las Recomendaciones UIT-R

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

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

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

Publicación electrónica
Ginebra, 2024

© UIT 2024

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

RECOMENDACIÓN UIT-R RS.1166-5

**Criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia*
para sensores activos a bordo de vehículos espaciales**

(1995-1998-1999-2006-2009-2023)

Cometido

En la presente Recomendación se proporcionan los criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia para los sensores activos a bordo de vehículos espaciales en las bandas atribuidas al SETS (activo). El Anexo contiene los fundamentos técnicos para la definición de estos criterios aplicables a los diversos tipos de sensores activos a bordo de vehículos espaciales. Los tipos de sensores incluyen altímetros, dispersímetros, radares de precipitación, radares de apertura sintética y radares de perfil de nube.

Palabras clave

Servicio de exploración de la Tierra por satélite (activo), teledetección, sensores activos, radar de precipitación, radar de apertura sintética (SAR), altímetro, dispersímetro, radar de perfil de nubes

Abreviaturas y glosario

DPR	Radar de precipitación dual
DSD	Distribución del tamaño de las gotas
GPM	Medición de precipitaciones a escala mundial
IFOV	Campo de visión instantánea
ITCZ	Zona de convergencia intertropical
PR	Radar de precipitación
TRMM	Misión de medición de la precipitación tropical
VPRF	Frecuencia de repetición de impulsos variable

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que los sistemas de teledetección activos por microondas a bordo de vehículos espaciales requieren la bandas de frecuencia específicas que dependen de los fenómenos que se han de observar;
- b) que se han atribuido algunas bandas de frecuencias a los sistemas de teledetección activos por microondas a bordo de vehículos espaciales;
- c) que estas bandas también están atribuidas a otros servicios radioeléctricos;
- d) que mediante estudios se han elaborado los requisitos de sensibilidad de las mediciones;
- e) que los requisitos de calidad de funcionamiento de los sensores activos pueden establecerse en términos de precisión de la medición de los parámetros físicos y de disponibilidad, medida en el satélite, suponiendo que la degradación causada por otros elementos del sistema sea insignificante;

* Los criterios de interferencia no implican automáticamente criterios de compartición.

f) que el establecimiento de los objetivos de calidad de funcionamiento para los sensores activos de microondas a bordo de vehículos espaciales constituyen un requisito previo al establecimiento de los criterios de interferencia asociados;

g) que es preciso contar con criterios de interferencia a fin de asegurar que los sistemas puedan diseñarse para lograr la adecuada calidad de funcionamiento en presencia de interferencia, evaluar la compatibilidad con los sistemas de otros servicios y, si es necesario, ayudar a desarrollar criterios para la compartición de bandas de frecuencias entre los servicios;

h) que en el Anexo 1 figuran las bases técnicas para los criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia basadas en los datos obtenidos de los sensores activos representativos,

recomienda

1 que se apliquen los criterios de calidad de funcionamiento consignados en el Cuadro 1 a los instrumentos utilizados para los sistemas activos de adquisición de datos en la atmósfera, los océanos y la superficie de la Tierra:

CUADRO 1

Banda de frecuencias	Criterios de calidad de funcionamiento				
	Dispersímetro	Altimetro	Reproductor de imágenes SAR	Radar de medición de las precipitaciones	Radar de perfil de nubes
432-438 MHz			Reflectividad mínima de -36 dB		
1 215-1 300 MHz	Reflectividad mínima de -32 dB		Reflectividad mínima de -36 dB		
3 100-3 300 MHz		Precisión de nivel del mar ≤ 3 cm	Reflectividad mínima de -26 dB		
5 250-5 570 MHz	Velocidad del viento ≥ 2 m/s	Precisión de nivel del mar ≤ 2 cm	Reflectividad mínima de -30 dB sobre tierra y de -33 dB sobre el océano		
8 550-8 650 MHz	Velocidad del viento ≥ 3 m/s	Precisión de nivel del mar ≤ 3 cm	Reflectividad mínima de -21 dB		
9 200-10 400 MHz	Velocidad del viento ≥ 3 m/s	Precisión de nivel del mar ≤ 3 cm	Reflectividad mínima de -18 dB		
13,25-13,75 GHz	Velocidad del viento ≥ 3 m/s	Precisión de nivel del mar ≤ 2 cm	Reflectividad mínima de -27 dB	Índices mínimos de pluviosidad de 0,7-0,75 mm/h	
17,2-17,3 GHz	Velocidad del viento ≥ 3 m/s		Reflectividad mínima de -25 dB	Índices mínimos de pluviosidad de 0,7-0,75 mm/h	
24,05-24,25 GHz				Índices mínimos de pluviosidad de 0,7-0,75 mm/h	
35,5-36 GHz	Velocidad del viento ≥ 3 m/s	Precisión de nivel del mar ≤ 2 cm	Reflectividad mínima de -22 dB	Índices mínimos de pluviosidad de 0,05-0,2 mm/h	-24 dBZ $\pm 10\%$
78-79 GHz					-27 dBZ $\pm 10\%$
94-94,1 GHz				Índices mínimos de pluviosidad de 0,05 mm/h	-35 dBZ $\pm 10\%$

CUADRO 1 (*fin*)

Banda de frecuencias	Criterios de calidad de funcionamiento				
	Dispersímetro	Altimetro	Reproductor de imágenes SAR	Radar de medición de las precipitaciones	Radar de perfil de nubes
133,5-134 GHz					-34 dBZ ±10%
237,9-238 GHz					-44 dBZ ±10%

dBZ: Reflectividad «unitaria» de radar utilizada en meteorología que representa una relación de potencia logarítmica (en decibeles, o dB) con respecto al factor de reflectividad del radar, Z , con referencia a un valor de $1 \text{ mm}^6/\text{m}^3$.

SAR: Radar de apertura sintética.

2 que los criterios de disponibilidad de datos y de interferencia consignados en el Cuadro 2 se apliquen a los instrumentos utilizados para la teledetección activa de la atmósfera, los océanos y la superficie de la Tierra.

CUADRO 2

Tipo de sensor	Criterios de interferencia		Criterios de disponibilidad de datos (%)	
	Degradación de la calidad de funcionamiento	I/N (dB)	Sistemática	Aleatoria
Radar de apertura sintética	10% de degradación de la desviación típica	-6	99	95
Altimetro	4% de degradación en el ruido debido a la altura	-3	99	95
Dispersímetro	8% de degradación en la medición de la retrodispersión de radar típica para deducir las velocidades del viento	-5	99	95
Radar de medición de las precipitaciones	7% de aumento en la tasa de pluviosidad mínima	-10	99,8	99,8
Radar de perfil de nube	10% de degradación en la reflectividad mínima debida a las nubes	-10	99	95

En las bandas con una atribución secundaria, los criterios de interferencia se proporcionan con el único fin de indicar la degradación de la calidad de funcionamiento respecto a los servicios primarios.

Anexo 1

**Criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia para
los sensores activos a bordo de vehículos espaciales**

ÍNDICE

		<i>Página</i>
1	Introducción.....	5
	1.1 Interferencia sistemática o aleatoria	5
2	Altímetros	6
	2.1 Criterios de calidad de funcionamiento	6
	2.2 Criterios de interferencia	6
3	Dispersímetros.....	8
	3.1 Criterios de calidad de funcionamiento	8
	3.2 Criterios de interferencia	10
4	Radars de medición de las precipitaciones	11
	4.1 Radars de precipitación basados en DPR-GPM.....	12
5	Radars de apertura sintética	15
	5.1 Criterios de calidad de funcionamiento de los radars de apertura sintética (SAR).....	16
	5.2 Criterios de interferencia de los SAR	16
6	Radars de perfil de nube	21
	6.1 Criterios de calidad de funcionamiento de los radars de perfil de nube a 94 GHz.....	21
	6.2 Criterios de interferencia de los radars de perfil de nube que funcionan a 94 GHz.....	21
	6.3 Criterios de disponibilidad de los radars de perfil de nube.....	22
7	Zona de medición de interés para la evaluación de la interferencia sistemática	22
8	Aspectos relativos a la interferencia transitoria por impulsos.....	22
	8.1 Determinación del valor de cresta de la potencia transitoria para determinados métodos de modulación	23
9	Parámetros habituales de los sensores del SETS (activo) que pueden utilizarse para determinar los efectos de cada tipo de interferencia.....	25

1 Introducción

Los criterios de calidad de funcionamiento para sensores activos a bordo de vehículos espaciales son necesarios para desarrollar los criterios de interferencia. A su vez, estos últimos pueden utilizarse para evaluar la compatibilidad de los sistemas de radionavegación y de radiolocalización con sensores activos en las bandas de frecuencias comunes.

En el presente Anexo aparecen las bases técnicas para desarrollar los criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia en los diversos tipos de sensores activos a bordo de vehículos espaciales. Los tipos de sensores incluyen altímetros, dispersímetros, radares de medición de las precipitaciones, radares de apertura sintética y radares de perfil de nube.

Los criterios se basan en los diseños de sistemas científicos de sensores activos a bordo de vehículos espaciales actuales o planificados, así como en los requisitos de funcionamiento conexos. Los futuros sistemas científicos de sensores activos a bordo de vehículos espaciales, más allá de los que abordan en esta Recomendación, tendrían que examinarse para determinar si podrían aceptar los mismos niveles de señales interferentes y las correspondientes condiciones espaciales y temporales.

1.1 Interferencia sistemática o aleatoria

En virtud de lo establecido en el *recomienda 2*, los criterios sobre interferencia y disponibilidad de datos que figuran en el Cuadro 2 deben aplicarse a los instrumentos utilizados para la detección activa de la superficie de la Tierra, los océanos y la atmósfera. En el Cuadro 2 se proporcionan los criterios sobre disponibilidad de datos aplicables a dos tipos de interferencia, a saber, sistemática y aleatoria.

La interferencia sistemática es la que se produce de forma repetida en el mismo lugar. Al producirse este tipo de interferencia debe aplicarse el criterio sobre disponibilidad de datos que figura en el Cuadro 2, esto es, del 99% para todos los tipos de sensores, salvo para el radar de precipitación, para el que cabe aplicar el 99,8%.

La aplicación de la disponibilidad sistemática de datos a los análisis de compartición y compatibilidad conlleva, en primer lugar, la determinación de la interferencia objeto de análisis en cuanto a su recurrencia para la repetición de la medición del sensor de una ubicación específica. Si se comprueba que dicha interferencia objeto de análisis se repite en las mediciones de los sensores del mismo lugar, pero posiblemente con varios tipos de señal procedentes de ese lugar (por ejemplo, radares con salto de frecuencia o de barrido), se considera que la interferencia es sistemática; en consecuencia, el criterio de disponibilidad de datos de interferencia sistemática debe aplicarse para la evaluación de los resultados del estudio.

La interferencia aleatoria es la que provoca interrupciones específicas breves (de 2 segundos, o menos, en la mayor parte de los casos) y que se dispersan aleatoriamente con respecto a todo el periodo de tiempo y a las zonas de observación. A los efectos de los análisis de compartición y compatibilidad realizados, ello es aplicable al tiempo de observación y a la zona de medición escogidos para la evaluación de los criterios de disponibilidad de datos. Habida cuenta de que los efectos de la interferencia aleatoria son menos adversos que los de la sistemática, el criterio de disponibilidad de datos aleatorios en caso de interferencia aleatoria es del 95%, excepto para los radares de precipitación, para los que es del 99,8%.

La aplicación de la disponibilidad de datos sistemática a los análisis de compartición y compatibilidad conlleva, en primer lugar, determinar el tipo de interferencia que ha de evaluarse, esto es, sistemática o aleatoria. A continuación, el análisis deberá establecer el número de casos de interferencia que superan los criterios relativos al umbral de interferencia que se produce en una zona de medición de interés, y el resumen de resultados deberá facilitar una evaluación de ese resultado con respecto a los criterios de disponibilidad de datos aplicables.

2 Altímetros

Este punto contiene información sobre los criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia para los altímetros a bordo de vehículos espaciales en las bandas de frecuencias de 3,1-3,3 GHz, 5,25-5,57 GHz, 8,55-8,65 GHz, 9,2-10,4 GHz¹, 13,25-13,75 GHz y 35,5-36 GHz.

2.1 Criterios de calidad de funcionamiento

Los altímetros a bordo de vehículos espaciales realizan, tras el procesamiento de los datos, mediciones del nivel del mar con una precisión mínima de 2 a 3 cm, en función de la banda de que se trate. Un aumento de 0,1 cm en el ruido en las mediciones de altura debido a la interferencia no afectaría de forma material a los datos y sería aceptable. Esto es, una degradación del 4% en dicho ruido a raíz de la interferencia podría ser aceptable, puesto que ello no impediría cumplir los objetivos de la misión.

Un requisito de las misiones del altímetro es la adquisición de al menos el 90% de todos los datos posibles sobre los océanos y masas de agua medibles sobre la superficie continental. El objetivo de diseño es superior a dicho requisito mínimo y se ha establecido como la adquisición del 95% de todos los datos posibles medibles. Las observaciones deben realizarse para incluir mediciones lo más próximas posibles a la interfaz tierra-mar (alrededor de 15 km de la interfaz tierra-mar se producen distorsiones en la longitud de onda del altímetro y no se puede estimar la altura con precisión). En el balance para determinar las pérdidas de datos deben contemplarse todas las fuentes de pérdidas, incluidas las debidas a los sistemas de los vehículos espaciales, los instrumentos del altímetro, las maniobras, la interferencia, etc.

El requisito de disponibilidad para los datos del altímetro es del 95%, suponiendo que las interrupciones individuales asociadas sean breves y aparezcan dispersas de manera aleatoria a lo largo de todos los instantes y zonas de observación (la mayoría de las interrupciones duran 2 s o menos). Cabe tener en cuenta que, pese a determinar si se puede cumplir el requisito de disponibilidad del 95% constituye un análisis relativamente sencillo, es difícil analizar las interrupciones por su característica de dispersión aleatoria a lo largo de todo el periodo de observación y en todas las zonas geográficas

La influencia de la interferencia que siempre está presente en una zona de medición del sensor determinada es mucho más importante que la de la interferencia aleatoria, puesto que nunca pueden obtenerse mediciones válidas para esas zonas geográficas. Para subsanar esa dificultad, el requisito para los altímetros es poder obtener datos válidos para al menos el 99% del periodo de tiempo para cada zona de medición de interés.

2.2 Criterios de interferencia

Los altímetros típicos tienen balances del enlace que dan lugar a unas relaciones S/N de 13 dB (salvo los altímetros de 35,5-36 GHz) en la anchura de banda de la resolución de la gama del receptor de 39,9 dB/Hz (9 772,3 Hz). El ruido en la medición de alturas realizada por el altímetro varía según la fórmula $1 + 2/(S/N)$. Para una señal de retorno con una S/N de 13 dB antes de la interferencia, la adición de ésta provoca el siguiente aumento en el ruido de las mediciones de altura, como se señala en el Cuadro 3.

¹ Los altímetros funcionan para cualquier parte de la banda de frecuencias 9,2-10,4 GHz con una anchura de banda de 300 MHz.

CUADRO 3

Aumento en el ruido de las mediciones de altura realizadas mediante el altímetro con respecto al nivel de interferencia²

Nivel de interferencia	S/N (dB)		Degradación (%)	
	Interferencia no blanca	Interferencia blanca	Interferencia no blanca	Interferencia blanca
Ninguno	13	13	Línea de base	Línea de base
10 dB por debajo del ruido	12,6	12,99	1	0,05
3 dB por debajo del ruido	11,25	12,5	4,5	1
Igual al ruido	10	11,5	9	3,8
10 dB por encima del ruido	2,6	3	91	82

En el caso de los altímetros de 35,5-36 GHz, los efectos atmosféricos y las limitaciones tecnológicas tienen como resultado un presupuesto de enlace menos favorable (relación S/N cercana a 10 dB) y por ende la sensibilidad frente al nivel de interferencia es mayor, por lo cual se han tenido en cuenta los siguientes valores:

CUADRO 4

Aumento en el ruido de las mediciones de altura realizadas mediante el altímetro con respecto al nivel de interferencia³

Nivel de interferencia	S/N (dB)		Degradación (%)	
	Interferencia no blanca	Interferencia blanca	Interferencia no blanca	Interferencia blanca
Ninguno	10	10	Línea de base	Línea de base
10 dB por debajo del ruido	9,6	9,98	1,7	0,08
6 dB por debajo del ruido	9,0	9,9	4,2	0,5
3 dB por debajo del ruido	8,2	9,5	8,4	1,2
1,5 dB por debajo del ruido	7,7	9,1	11,8	3,8
Igual al ruido	7,0	8,5	17	6,9
10 dB por encima del ruido	-0,4	0	167	150

Por consiguiente, el criterio de interferencia admisible para los altímetros de este ejemplo es un nivel de la potencia de señal interferente combinada de -117 dB(W/320 MHz) en la banda de 13-14 GHz

² Excepto para los altímetros de 35,5-36 GHz.

³ Para altímetros de 35,5-36 GHz.

y un nivel de -119 dB(W/450 MHz) en la banda de 35,5-36,0 GHz que provocaría un aumento inaceptable en el ruido de las mediciones de altura. Cabe señalar que el criterio de interferencia perjudicial debe calcularse en función de las características del sistema del sensor de que se trate

En las bandas de frecuencias compartidas, la disponibilidad de los datos del altímetro debe ser superior al 95% para todos los emplazamientos de la zona de servicio del sensor en los que se producen pérdidas de manera aleatoria con dispersión para todo el periodo y todas las zonas de observación, y superior al 99% para cada zona de medición cuando las pérdidas tienen lugar sistemáticamente en los mismos emplazamientos.

3 Dispersímetros

Este punto contiene información sobre los criterios de interferencia y de calidad de funcionamiento para los dispersímetros a bordo de vehículos espaciales en las bandas de frecuencias de 1,215-1,3 GHz, 5,25-5,57 GHz, 8,55-8,65 GHz, 9,2-10,4 GHz, 13,25-13,75 GHz, 17,2-17,3 GHz y 35,5-36,0 GHz. Se proporcionan los criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia para los dispersímetros activos a bordo de vehículos espaciales que pueden utilizarse para analizar la compatibilidad de los dispersímetros activos a bordo de vehículos espaciales y los sistemas de radionavegación y radiolocalización en esas bandas.

Las emisiones de radiofrecuencia no deseadas que llegan al receptor del dispersímetro pueden alterar la medición de σ_0 realizada por el dispersímetro del radar, siendo σ_0 el coeficiente de retrodispersión del radar normalizado. El volumen de degradación dependerá de los valores estadísticos de la interferencia externa.

3.1 Criterios de calidad de funcionamiento

En los sistemas de dispersímetros se realiza una estimación de la potencia de la señal de retorno del eco midiendo primeramente la potencia «señal + ruido» (es decir, el retorno del eco más la contribución de ruido del sistema), y restando a continuación la potencia «ruido únicamente» (una estimación del ruido del sistema únicamente, o «ruido de fondo»). El ruido del sistema incluye las emisiones térmicas procedentes de la Tierra así como el ruido por la antena y el guíaondas y el factor de ruido del receptor. Para optimizar la calidad de funcionamiento del sistema, las mediciones de «señal + ruido» y «ruido únicamente» se realizan para distintas anchuras de banda y/o para instantes diferentes. Esta estrategia se basa en el hecho de que la temperatura nominal del sistema es fundamentalmente blanca durante la secuencia de medición (estacionaria y con una distribución de potencia espectral plana).

Si aparece interferencia externa, el nuevo ruido de fondo compuesto es la suma de la interferencia y del ruido nominal del sistema. Habida cuenta de las estrechas bandas que utilizan los dispersímetros, el ruido puede considerarse blanco de forma aproximada. No obstante, dependiendo de la intensidad, la modulación, el diagrama de ganancia de la antena y la geometría de la fuente de interferencia, el ruido compuesto puede que no sea blanco a lo largo de toda la secuencia de medición. En ese caso, la medición de «ruido únicamente» no corresponderá al ruido de la medición «señal + ruido», lo que dará lugar a la aparición de errores en la estimación de σ_0 .

El error estimado de σ_0 como consecuencia de un error en la medición «ruido únicamente» determinado puede cuantificarse mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Error } \sigma_0 \text{ (dB)} = 10 \log [1 + (\alpha - 1) / SNR \sigma_0] \quad (1)$$

siendo:

$$SNR \sigma_0 \text{ (dB)} = 10 \log (S/N) = \text{relación señal/ruido del proceso de estimación } \sigma_0$$

con:

- S : densidad espectral de potencia de retorno del eco
 N : densidad espectral de potencia nominal del ruido ambiente (aproximadamente -200 dB(W/Hz) en la entrada del receptor del dispersímetro para antenas de «haz en abanico» y de «haz puntual»).

y

$$\alpha \text{ (dB)} = 10 \log \left(\frac{[N + (I_{s+n} / B_{s+n})]}{[N + (I_n / B_n)]} \right) \quad (2)$$

siendo:

- I_{s+n} : potencia media procedente de la fuente de interferencia en B_{s+n} durante el periodo de medición «señal + ruido»
 B_{s+n} : anchura de banda de la medición «señal + ruido»
 I_n : potencia media procedente de la fuente de interferencia en B_n durante el periodo de medición de «ruido únicamente»
 B_n : anchura de banda de la medición «ruido únicamente».

La influencia de la interferencia externa es más importante para vientos con velocidad baja. La velocidad del viento más reducida que pueden medir los dispersímetros a bordo de vehículos espaciales es de 2 ó 3 m/s, en función de la banda. Los resultados de simulaciones por ordenador llevadas a cabo para interferencias no estacionarias en el dispersímetro NSCAT han demostrado que el máximo valor de α (véase la ecuación (2)) que permitirá satisfacer los requisitos de calidad de funcionamiento para velocidades del viento de 3 m/s es de 0,7 dB. La interferencia será no estacionaria si se produce de forma dinámica y sus características estadísticas varían con el tiempo sin presentar pautas coherentes en materia de espectro, amplitud, fase o evolución temporal.

En el futuro, los dispersímetros pueden emplear antenas de haz puntual en vez de antenas de haz en abanico como se utilizan para el NSCAT. Las principales diferencias entre los dos tipos de dispersímetros, además del diagrama de antena, son la p.i.r.e. transmitida y la ganancia de antena de recepción. Los resultados de simulaciones por ordenador llevados a cabo para interferencias no estacionarias han demostrado que para satisfacer los requisitos de calidad de funcionamiento con velocidades del viento de 3 m/s puede tolerarse un valor máximo de $\alpha = 6$ dB (véase la ecuación (2)) con antenas de «haz puntual».

La pérdida admisible de los datos del dispersímetro debida a la interferencia procedente de estaciones de radiofrecuencia dispersadas aleatoriamente a lo largo de los océanos es el 5% para todos los datos tomados sobre todos los océanos.

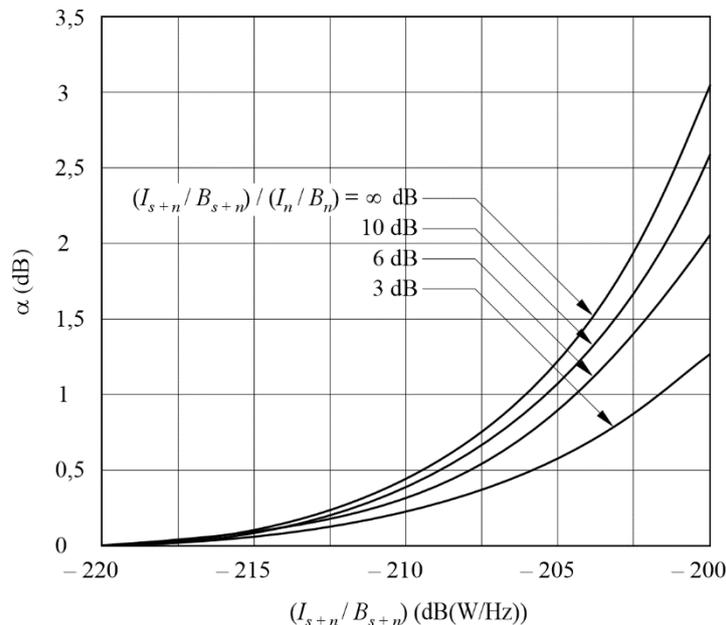
Cabe señalar que la determinación del cumplimiento del requisito de disponibilidad del 95% requiere un análisis relativamente sencillo; sin embargo, resulta complejo analizar las interrupciones por su característica de dispersión aleatoria para todas las horas y zonas de observación.

La pérdida admisible para la interferencia sistemática es del 1%. Dicha interferencia se define como la pérdida de datos de medición, esto es, la interferencia que rebasa los criterios de protección umbral, para los mismos emplazamientos geológicos en los que se obtuvieron las mediciones de sensores. Estas máximas pérdidas admisibles se han obtenido a partir del requisito del dispersímetro científico NSCAT de medir al menos el 90% de los vectores de viento sobre los océanos y teniendo en cuenta otras pérdidas de datos aleatoriamente distribuidas que se producen fundamentalmente en zonas con gran intensidad de lluvia.

3.2 Criterios de interferencia

En la Fig. 1 se representa la ecuación (2) para un dispersímetro con un ruido de fondo del receptor $N = -200$ dB(W/Hz). Se trata de un gráfico de α en función de la densidad espectral de potencia de la señal interferente (I_{s+n}/B_{s+n}) . Cabe señalar que para el valor de α se obtienen distintos resultados dependiendo de la forma de variación de la interferencia en el tiempo o en la anchura de banda. La Fig. 1 contiene una familia de curvas para diversos valores del parámetro $10 \log [(I_{s+n}/B_{s+n})/(I_n/B_n)]$.

FIGURA 1
Representación de varios valores del parámetro $10 \log [(I_{s+n}/B_{s+n})/(I_n/B_n)]$ (ruido blanco)



La separación en tiempo del periodo de medición «señal + ruido» desde el centro del periodo de medición del «ruido únicamente» es de aproximadamente 0,23 s. Durante ese tiempo el ángulo entre el dispersímetro del vehículo espacial y un punto específico en la superficie de la tierra variará aproximadamente $0,1^\circ$. Debido a la pequeña anchura de haz de la antena de haz en abanico ($0,42^\circ$, anchura de haz a 3 dB), pueden producirse variaciones de varios dB en los niveles de interferencia recibida a medida que los lóbulos laterales del dispersímetro se desplacen a través de un haz del transmisor interferente. Mediante exámenes técnicos se ha llegado a la conclusión de que un valor de 6 dB es la variación máxima que cabe esperar en la expresión $10 \log [(I_{s+n}/B_{s+n})/(I_n/B_n)]$ durante el periodo de medición en los casos en que no exista interferencia. A partir de la Fig. 1 se deduce, por lo tanto, que la máxima densidad espectral de potencia de interferencia que puede soportar cualquiera de las seis antenas de haz en abanico del dispersímetro NSCAT de ejemplo sin que se degrade la precisión de la medición es de -207 dB(W/Hz) o -174 dBW en cualquier anchura de banda de 2 kHz dentro de la anchura de banda de 1 MHz del canal de procesamiento.

En el caso de interferencia similar al ruido blanco, el valor máximo de la densidad espectral de potencia de interferencia aceptable sería de aproximadamente -194 dB(W/Hz) a la entrada del receptor, lo que en este ejemplo se traduce en un criterio de interferencia de -161 dBW en cualquier anchura de banda de 2 kHz dentro de la anchura de banda de 1 MHz del canal de procesamiento.

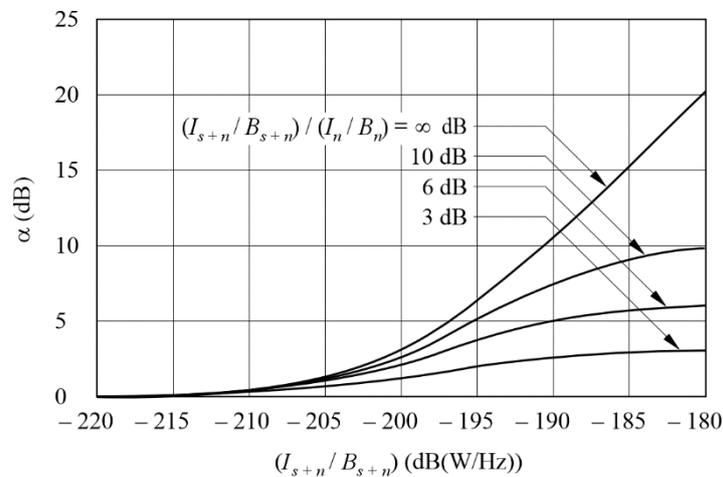
En el caso de ruido no blanco, el criterio de interferencia para un dispersímetro que utilice una antena de haz puntual puede determinarse para la hipótesis de caso más desfavorable de $10 \log [(I_{s+n}/B_{s+n})/(I_n/B_n)] = \pm\infty$. Esta situación representa el caso en el que la interferencia está presente

en la medición de «señal + ruido» o en la medición de «ruido únicamente», pero no en ambas simultáneamente.

Ello pone de manifiesto que el evento de interferencia debe examinarse pormenorizadamente en relación con la temporización del muestreo del sensor. Para los límites de transición de dicho evento, la interferencia que se produce durante cada medición del «ruido de la señal» y del «ruido únicamente» puede variar, lo que aumenta los efectos adversos de la interferencia en las mediciones del sensor.

De la Fig. 2 puede deducirse que el valor máximo de la densidad espectral de potencia de interferencia que puede soportar la antena de «haz puntual» de un dispersímetro similar al NSCAT sin que se degrade la medición es de -195 dB(W/Hz). Este requisito debe cumplirse para cualquier anchura de banda de 10 kHz dentro de la anchura de banda de 1 MHz del canal de procesamiento. No obstante, cabe tener en cuenta que estos resultados sólo se proporcionan como ejemplo con respecto al dispersímetro tipo NSCAT y que es necesario analizar los sistemas SETS específicos objeto de estudio.

FIGURA 2
Representación de varios valores del parámetro $10 \log [(I_{s+n} / B_{s+n}) / (I_n / B_n)]$ (ruido no blanco)



1166-01b

En el caso de interferencia similar a ruido blanco, el valor máximo de la densidad espectral de potencia de la interferencia sería de aproximadamente -185 dB(W/Hz) a la entrada del receptor de un dispersímetro con una antena de «haz puntual».

En las bandas de frecuencias compartidas, la disponibilidad de los datos del dispersímetro debe ser superior al 95% para todos los emplazamientos en la zona de servicio del sensor cuando las pérdidas se producen dispersadas de manera aleatoria y superior al 99% para cada zona de medición cuando las pérdidas se producen de forma sistemática en los mismos emplazamientos. Cabe señalar que la determinación del cumplimiento del requisito de disponibilidad del 95% requiere un análisis relativamente sencillo; sin embargo, resulta complejo analizar las interrupciones por su característica de dispersión aleatoria para todas las horas y zonas de observación.

4 Radares de medición de las precipitaciones

Este punto contiene información sobre los criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia para los radares de medición de las precipitaciones a bordo de vehículos espaciales en las bandas de frecuencias de 13,25-13,75 GHz, 17,2-17,3 GHz, 24,05-24,25 GHz, y 35,5-36,0 GHz. Los criterios

de calidad de funcionamiento y de interferencia para los radares activos de medición de las precipitaciones a bordo de vehículos espaciales que se proporcionan en los *recomienda* 1 y 2 de esta Recomendación pueden utilizarse para analizar la compatibilidad del funcionamiento de los radares activos de medición de las precipitaciones a bordo de vehículos espaciales con sistemas de radionavegación y radiolocalización en dichas bandas. En esta sección se facilita un ejemplo de análisis basado en un radar de precipitación dual (DPR) para medición de precipitaciones a escala mundial (GPM), que funciona a 13,597/13,603 GHz y 35,547/35,553 GHz.

El GPM emplea un radar de frecuencia de repetición de impulsos variable (VPRF) para aumentar el número de muestras en un campo de visión instantánea (IFOV). El transmisor de 35 GHz está diseñado para detectar lluvia ligera y distinguir entre lluvia y nieve, y el radar de 13 GHz se utiliza para detectar lluvia intensa. Los rangos dinámicos de ambos radares permiten estimar la distribución del tamaño de las gotas (DSD) de la precipitación.

4.1 Radares de precipitación basados en DPR-GPM

El primer radar de precipitación a bordo de un vehículo espacial fue el radar de precipitación (PR) para misiones de medición de la precipitación tropical (TRMM), cuyo lanzamiento se llevó a cabo en 1997. A raíz del éxito del TRMM, la misión GPM se lanzó en febrero de 2014. Dicha misión GPM mide actualmente las precipitaciones desde el espacio y proporciona una norma de referencia para relacionar las mediciones de precipitaciones obtenidas con respecto a otros sensores espaciales.

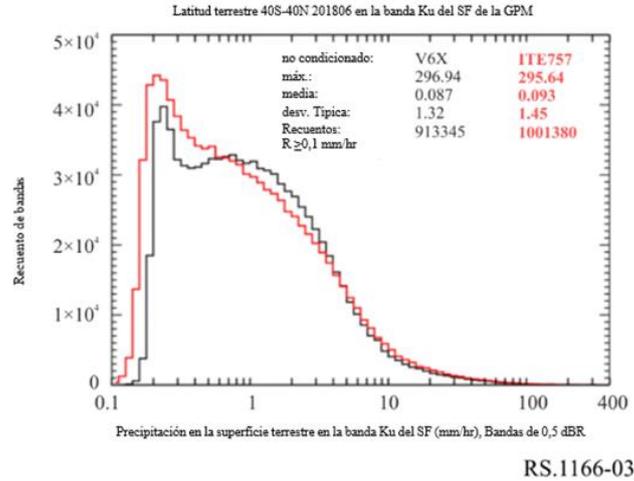
Se han considerado los objetivos de la misión y el diseño del DPR-GPM con objeto de elaborar los criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia que puedan utilizarse para evaluar la compatibilidad de dicho radar. Los criterios de interferencia se indican para cuantificar el nivel de interferencia autorizado y el volumen de datos perdidos debido a la interferencia, a fin de seguir permitiendo el cumplimiento de los objetivos de la misión.

4.1.1 Criterios de calidad de funcionamiento para 13,597/13,603 GHz

El requisito científico del DPR-GPM es lograr, tras el procesamiento de los datos, la medición de índices de precipitación iguales o superiores a 0,22 mm/h para 13,597/13,603 GHz.

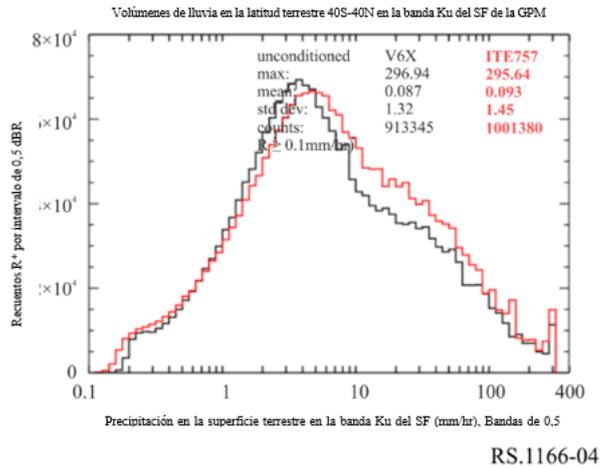
A continuación se proporciona la *dfp* de los índices de precipitación de la GPM, Versión 7 (en color rojo se representa la V7, y en negro la V6) entre 40° S y 40° N. Cabe señalar que se trata de recuperaciones sólo en la banda Ku y que el índice mínimo de precipitación detectable es de alrededor de 0,2 mm/h, en lugar de 0,5 mm/h. En consecuencia, si la interferencia aumenta la precipitación mínima detectable por encima de 0,5 mm/h, tendrá un impacto sustancial.

FIGURA 3
 Representación de la dfp de índices de pluviosidad para GPM, Versión 7 (en color rojo)
 y 6 (en color negro) (latitudes más bajas)



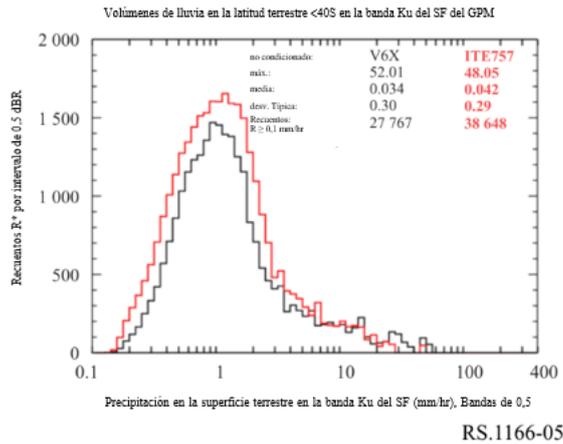
El valor de cresta se produce cerca de los 0,2 mm/hr. A continuación se muestra la distribución del volumen de lluvia (básicamente lluvia*área).

FIGURA 4
 Distribución del volumen de lluvia (latitudes más bajas)



El valor de cresta de los volúmenes de lluvia pasa a ser de unos 4 mm/hr, si bien el valor total a la izquierda de 0,5 mm/hr, aunque no es muy elevado, sigue siendo notable. Estos gráficos corresponden a latitudes bajas. A continuación se muestra un gráfico similar para valores elevados de latitud sur.

FIGURA 5

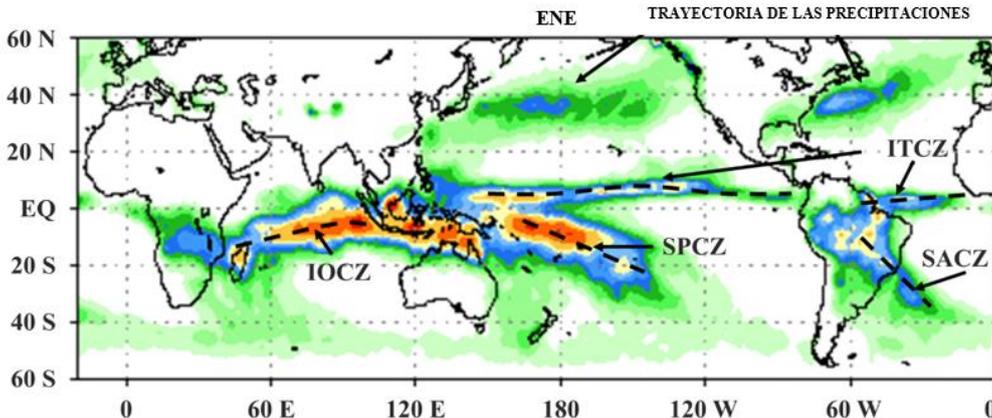


La distribución del volumen de lluvia (latitudes elevadas meridionales) para la contribución de las precipitaciones ligeras es aún mayor. Habida cuenta de ello, saber si la interferencia desplazará hacia la derecha el valor mínimo de precipitación detectable reviste suma importancia. El desplazamiento del umbral de precipitación detectable hacia la derecha puede repercutir en gran medida en la medición de la precipitación ligera, en particular en latitudes más elevadas para la GPM y el futuro radar AOS en la banda Ku.

La disponibilidad necesaria de datos de precipitaciones viene dada por el lugar en el que se producen dichas precipitaciones. Es importante obtener todas las posibles mediciones de intensidad de lluvia; sin embargo, revisten particular interés las mediciones en la Zona de convergencia intertropical (ITCZ), que es la zona limitada por el ecuador de la Tierra y 10° de latitud norte, y en la amplia zona que se extiende desde el continente marítimo al Pacífico Sur (denominada Conducto del monzón australiano y Zona de convergencia del Pacífico Sur (SPCZ)). Estas zonas importantes vienen generalmente limitadas por latitudes de 0°–10° N, 50°–180° E y 0°–10° S. En consecuencia, la zona de mayor interés se encuentra en la ITCZ. La Fig. 6 muestra las zonas de convergencia de especial interés para las mediciones del radar de precipitación. Por otro lado, se emplean sitios de «referencia real» para correlacionar los datos del radar de precipitación con las mediciones terrenales simultáneas. Un criterio sobre pérdidas de datos en la Zona de convergencia intertropical cuando aparece interferencia de forma aleatoria es el 0,2% de los datos posibles. Sin embargo, como se señala en otras partes de esta Recomendación, la interferencia aleatoria es difícil de caracterizar (en caso que ello sea posible) y de tener en cuenta en un análisis de interferencia.

FIGURA 6

Zonas de convergencia de particular interés a los efectos de medición del radar de precipitaciones



4.1.2 Criterios de interferencia

La interferencia similar al ruido que provoca un aumento en la medición del índice de precipitación de 0,2 a 0,5 mm/h corresponde a una degradación del 7% de la calidad de funcionamiento. Por consiguiente, la interferencia debe encontrarse 10 dB por debajo del nivel de ruido del sistema. Como dicho nivel en este ejemplo de PR es de -140 dBW, el nivel de ruido depende del sensor y debe calcularse para cada caso. La ecuación de cálculo del nivel de ruido es la siguiente:

$$N = 10 \log(T * k_B * BW) \text{ (dBW/BW)}$$

siendo:

T : temperatura de ruido del sistema en grados Kelvin

k_B : $1,381 \times 10^{-23}$ (constante de Boltzmann)

BW : Anchura de banda del sistema.

En las bandas de frecuencias compartidas, la disponibilidad de los datos del radar de precipitación debe ser superior al 99,8% de todos los emplazamientos situados en la zona de servicio de sensor cuando las pérdidas tienen carácter aleatorio. Cabe señalar que la determinación del cumplimiento del requisito de disponibilidad del 99,8% requiere un análisis relativamente sencillo; sin embargo, resulta complejo analizar las interrupciones por su característica de dispersión aleatoria para todas las horas y zonas de observación.

4.1.3 Radar de precipitación GPM en la banda 35 GHz

4.1.3.1 Criterios de calidad de funcionamiento

El porcentaje de lluvia de poca intensidad que cae en la región de elevada latitud es mayor que la de la región tropical. Por tanto, es necesario medir la lluvia de poca intensidad en la mayor medida posible a fin de obtener una estimación libre de error sistemático de las estadísticas de distribución de intensidad de lluvia sobre la región de elevada latitud. La medición de una intensidad de lluvia de 0,2 mm/h es uno de los requisitos de medición de la misión DPR-GPM. Por esta razón, se especifica que la reflectividad de radar mínima detectable sea menor que 12 dBZ como criterios de calidad de funcionamiento del radar de precipitación de 35 GHz.

4.1.3.2 Criterios de interferencia

La reflectividad del radar de 12 dBZ corresponde a una intensidad de lluvia de 0,2 mm/h. Este valor puede aumentar hasta 0,22 mm/h. Esta degradación de caída de funcionamiento corresponde a un incremento del 10% de la temperatura de ruido del sistema, o a un aumento de 0,5 dB aproximadamente del nivel de ruido del sistema. Este criterio es esencialmente el mismo que en el caso del radar de precipitación de 13 GHz. Con respecto al criterio de la pérdida de datos por la interferencia, los mismos criterios para el radar de precipitación en la banda de 13 GHz son aplicables al radar de precipitación de 35 GHz. La pérdida de datos admisible para el radar de precipitación GPM de 35 GHz es del 0,2%.

Cabe tener en cuenta que el nivel de interferencia admisible proporcionado en este ejemplo es correcto sólo para este ejemplo. Para cada radar de precipitación, los niveles de interferencia admisibles deben calcularse con arreglo a las características del sistema de cada radar de precipitación.

5 Radares de apertura sintética

Esta sección contiene información sobre los criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia para los sensores activos de radar de imagen a bordo de vehículos espaciales en las bandas de frecuencias de 432-438 MHz, 1 215-1 300 MHz, 3 100-3 300 MHz, 5 250-5 570 MHz, 8 550-8 650 MHz y 9 200-10 400 MHz. Los criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia

pueden utilizarse para analizar la compatibilidad del funcionamiento de los sensores activos de radar de imagen a bordo de vehículos espaciales con sistemas de radionavegación y radiolocalización, así como sistemas de otros servicios, en dichas bandas.

5.1 Criterios de calidad de funcionamiento de los radares de apertura sintética (SAR)

Por lo general, los radares de apertura sintética(SAR) a bordo de vehículos espaciales se utilizan para producir mapas de imágenes de radar del terreno que sobrevuelan mientras que el movimiento del vehículo espacial crea una apertura sintética durante un periodo de apertura típico de sólo 0,2-10 s. Cualquier señal que interfiera durante este periodo de apertura afecta a la imagen de esa característica particular. Muchos SAR toman imágenes principalmente de la tierra y de las transiciones entre tierra y agua en los litorales. Los investigadores eligen un número finito de sitios para tomar imágenes a lo largo de una gama de ángulos de abertura a medida que las órbitas se repiten dentro de un periodo de 1-14 días con una ligera deriva. Toda interferencia que perturbe los datos de una medición SAR obtenidos de un sitio terrenal observado durante cualquiera de las mediciones tomadas para ángulos de observación diferentes incidirá adversamente en la calidad de funcionamiento de la medición global. Los SAR se utilizan también para elaborar mapas topográficos que pueden utilizarse para modelos de elevación digital. Algunos SAR utilizan interferometría con repetición de ciclos para producir mapas topográficos en dos barridos. Cabe prever que la interferencia en cualquiera de los barridos afecte adversamente a la calidad de funcionamiento.

Las misiones SAR de formación de imágenes o de topografía deben adquirir al menos el 99% de los datos que se pueden obtener en los sitios seleccionados a lo largo de la superficie de la tierra o las transiciones entre tierra y océano. Este presupuesto para datos perdidos es independiente de otras fuentes de pérdida tales como las debidas a los sistemas del vehículo espacial, el instrumento SAR, etc.

El requisito de disponibilidad de los datos SAR es de 99%, suponiendo que las pérdidas sean de poca duración y aleatorias a lo largo de las zonas y durante el periodo de adquisición de datos. Sin embargo, dicho requisito de disponibilidad del 99% debe aplicarse tanto con respecto al porcentaje de la zona de interés que se ve afectada, como con respecto a los periodos de observación durante los que se ven afectadas las mediciones. En el caso de los instrumentos en órbita polar, transcurre un tiempo de observación sustancial sobre las regiones de latitud elevada, lo que puede dar lugar a una subestimación de la interferencia en otras zonas si sólo se tiene en cuenta el tiempo de observación como criterio de disponibilidad. Cabe señalar que la determinación del cumplimiento del requisito de disponibilidad del 99% requiere un análisis relativamente sencillo; sin embargo, resulta complejo analizar las interrupciones por su característica de dispersión aleatoria para todas las horas y zonas de observación. La interferencia en un emplazamiento geográfico dado con carácter sistemático reviste mayor gravedad, sobre todo si se produce en uno de los sitios de interés de un investigador, en el que podrían tener lugar al mismo tiempo experimentos de validación o experimentos verdaderos en tierra. La interferencia en un emplazamiento geográfico dado para la toma de imágenes SAR o misiones topográficas podría crear una brecha en el mapa de cobertura global.

5.2 Criterios de interferencia de los SAR

Se han establecido criterios de interferencia para los radares de imagen a bordo de vehículos espaciales, según figuran en el Cuadro 2. En dicho Cuadro el criterio de interferencia para los radares de apertura sintética es una relación interferencia-ruido (I/N) de -6 dB, lo que corresponde a un 10% de degradación de la medición de la desviación típica de la potencia de píxel del SAR.

Este nivel de interferencia podría excederse considerando el efecto de mitigación de la interferencia de las características de modulación y de discriminación de procesamiento SAR de los sistemas que funcionan en la banda compartida. Con objeto de cumplir los objetivos de la misión, estos niveles no pueden excederse para determinados valores porcentuales de las zonas de interés para más del 1% en

el caso de ocurrencias sistemáticas de interferencia y más del 5% en el caso de interferencias aleatorias.

Cabe tener en cuenta que la aplicación de los criterios de interferencia al porcentaje de imágenes afectadas puede dar lugar a una subestimación de la interferencia en las regiones no polares en el caso de instrumentos utilizados por un amplio periodo de tiempo sobre las regiones polares, habida cuenta de su órbita. En consecuencia, se propone aplicar los criterios tanto a los porcentajes de imágenes afectadas (tiempos de observación afectados) como a las zonas de interés afectadas.

Los datos brutos del SAR se procesan tanto en alcance como en acimut para generar una imagen de radar. La señal de retorno que devuelve el blanco presenta una dispersión lineal en frecuencia, tanto en alcance como en acimut. El procesador correlaciona los datos en ambas dimensiones y por lo general la ganancia de procesamiento oscila entre 20 y 40 dB para el eco de retorno. Las señales de interferencia y ruido tienen ganancias de procesamiento muy inferiores. El ruido del receptor tiene una ganancia de casi 0 dB en alcance. Las señales interferentes en el mismo nivel de entrada que el ruido tienen diferentes ganancias de procesamiento, en función del tipo de modulación de la forma de onda.

5.2.1 Ganancia de procesamiento del ruido e interferencia similar al ruido

El ruido del sistema, con referencia al puerto de la antena, consiste fundamentalmente en el ruido de la antena y el ruido del receptor frontal. Este ruido puede modelarse como ruido blanco, estacionario o Gaussiano. El correlator del procesador es básicamente un filtro adaptado para los impulsos, o fluctuaciones, con modulación de frecuencia lineal. La ganancia de procesamiento en alcance para el ruido es de 0 dB. La ganancia de procesamiento en acimut es N^2 para la integración coherente de N retornos durante una apertura sintética y N para el ruido. El tiempo de integración de apertura sintética y una PRF adecuada son necesarios para procesar los píxeles hasta determinado tamaño de resolución en acimut ρ_{AZ} . Ello se calcula como se indica a continuación:

$$G_{NAZ} = T_I PRF$$

$$T_I = \frac{\lambda R_S}{v L_{eff}}$$

$$PRF = 1,2 \frac{v}{\rho_{AZ}} \text{ (para modo en mapa de bandas)}$$

siendo:

- G_{NAZ} : ganancia de procesamiento en acimut del ruido
- T_I : tiempo de integración en acimut SAR
- PRF : frecuencia de repetición de los impulsos
- λ : longitud de onda
- R_S : distancia oblicua
- v : velocidad de la plataforma de vehículo espacial
- L_{eff} : longitud de la antena efectiva en acimut
- ρ_{AZ} : resolución en acimut.

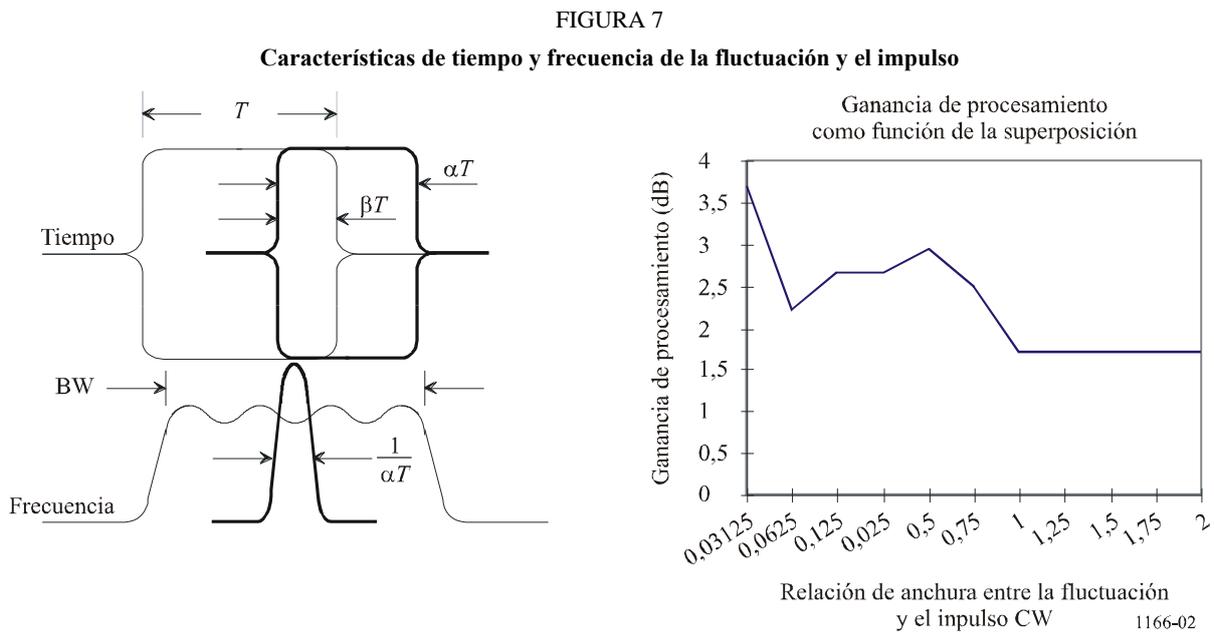
A título de ejemplo, para un SAR con anchura de banda de 600 MHz y una antena de 3 m que funcione cerca de los 9,6 GHz en modo en mapa de bandas, $\lambda = 0,03125$ m, $R_S = 535,8$ km a un ángulo de incidencia de 20° , $v = 7,05$ km/s y $L_{eff} = 3$ m, entonces $T_I = 0,8$ s. Para $\rho_{AZ} = 1$ m, $PRF = 8460$ Hz y la ganancia de procesamiento en acimut para el ruido G_{NAZ} será de 38 dB.

Para el mismo SAR cuya anchura de banda es 1,2 GHz en modo proyector, el tiempo de integración en acimut reviste más importancia. Si el haz principal del SAR abarca la zona prevista durante 3 s y la PRF es de 6 000 Hz, la ganancia de procesamiento en acimut pasa a ser 42 dB.

5.2.2 Ganancia de procesamiento de otras señales interferentes

5.2.2.1 Ganancia de procesamiento en alcance para interferencia CW por impulsos

Cuando la frecuencia central RF de las señales interferentes CW por impulsos se encuentra dentro de la banda de frecuencias de procesamiento, la ganancia de procesamiento de la interferencia en relación con el ruido varía junto con el porcentaje de anchura superpuesta del impulso CW con respecto a la anchura del impulso FM lineal, como se indica en la Fig. 7.



Suponiendo que la anchura del impulso interferente es inferior a la anchura del impulso de fluctuación y está envuelta en la fluctuación (es decir, $\alpha = \beta$), entonces la ganancia de procesamiento se indica como una función de la anchura del impulso fraccional, tal como se muestra en la Fig. 7.

5.2.2.2 Ganancia de procesamiento en alcance para señales CW interferentes sin impulsos

Se supone que la frecuencia central RF de la señal CW interferente sin impulsos se encuentra en la banda de frecuencias de procesamiento. Para un nivel de señal interferente igual al nivel del ruido, la ganancia de procesamiento CW es de 1,7 dB. Para cada píxel de imagen, ese valor es el mismo que para una señal interferente CW por impulsos con la misma anchura que el impulso de fluctuación, y la relación de anchura es la unidad.

5.2.2.3 Ganancia de procesamiento en alcance para señales interferentes con FM lineal

Se supone que el espectro interferente de señales con modulación de frecuencia lineal cae dentro de la banda de frecuencias de procesamiento y que el impulso interferente se superpone al impulso de eco de retorno, según se indica en la Fig. 7.

Representemos la señal fluctuante $f(t)$ con la siguiente ecuación:

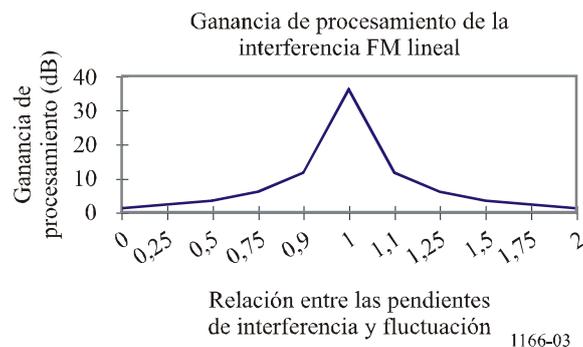
$$f(t) = \text{rect}(t / T_1) e^{j2\pi f_0 t + j\pi \mu t^2} \tag{1}$$

siendo:

- rect(t): función rectangular de la anchura unitaria
- f_0 : frecuencia portadora RF
- μ : pendiente.

La ganancia de procesamiento del impulso interferente varía con la relación entre las pendientes $|\mu'/\mu|$ en aproximadamente la misma anchura de impulso (es decir, $\alpha = 1$), según se indica en la Fig. 8. La pendiente del impulso interferente es μ' y la pendiente de la fluctuación de radar es μ .

FIGURA 8



5.2.2.4 Ganancia de procesamiento en alcance para otras formas de onda o modulaciones de radar interferentes

Los radares terrenales interferentes tienen diversas formas de onda/modulaciones tales como los códigos Barker, FM no lineal, etc. Cada una de éstas puede modelarse y se pueden calcular las ganancias de procesamiento en relación con el ruido. Aquí no se contemplan esas modulaciones. Cabe señalar que el valor de cresta de la ganancia de procesamiento de otras formas de onda o modulaciones por impulsos no sería superior al de la interferencia FM lineal (como se muestra en la Fig. 8) debido al filtrado inadecuado. Sin embargo, aunque no se contemple pormenorizadamente la ganancia de procesamiento en alcance, la ganancia de procesamiento en acimut sigue perteneciendo a esas formas de onda con impulsos.

5.2.2.5 Ganancia de procesamiento en acimut de las señales interferentes con impulsos

El procesamiento en acimut del SAR se efectúa mediante la adición de los retornos del eco a medida que la iluminación del haz de la antena en tierra pasa por la zona seleccionada. En lo que respecta al ruido, la ganancia de procesamiento en acimut es N , para la integración de N impulsos durante una apertura sintética. En lo que respecta a los impulsos interferentes, el escalonamiento de la señal interferente dentro de cada ventana de alcance es diferente de retorno a retorno puesto que la señal interferente por impulsos y el SAR tienen PRF diferentes. En lo tocante a la señal interferente con impulsos, los análisis efectuados previamente utilizando simulaciones para sucesivas ventanas de alcance y la adición de los retornos durante un intervalo de integración SAR han demostrado que las potencias de cresta instantáneas de los impulsos interferentes procesados en acimut varían entre 0 dB y 9,5 dB.

5.2.3 Cálculo de la interferencia admisible

Los niveles de interferencia admisible especificados *supra* pueden diferir al considerar el efecto de mitigación de la interferencia de las características de modulación y discriminación de procesamiento

SAR de los sistemas que funcionan en la banda. La potencia de la señal interferente admisible P_I puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$P_I = I/N \cdot P_N \cdot \frac{G_{NAZ}}{G_{IAZ}} \cdot \frac{G_{NRNG}}{G_{IRNG}} \quad (2)$$

siendo:

I/N : relación interferencia-ruido admisible en la salida del procesador

P_N : potencia de ruido en el puerto de la antena

G_{NAZ} : ganancia de procesamiento de ruido en acimut

G_{IAZ} : ganancia de procesamiento de la señal interferente en acimut

G_{NRNG} : ganancia de procesamiento de ruido en alcance

G_{IRNG} : ganancia de procesamiento de la señal interferente en alcance.

Las ganancias de procesamiento son los productos de las ganancias de procesamiento en alcance y en acimut. Normalmente la ganancia de procesamiento en alcance para la interferencia es pequeña, es decir, inferior a 4 dB; en cambio, la ganancia de procesamiento en acimut para la interferencia, normalmente es de 20 a 40 dB menos que la correspondiente al ruido.

La metodología utilizada para determinar la máxima señal interferente admisible es la siguiente:

- 1) Cálculo de la potencia de ruido de entrada P_N con arreglo a las características del receptor del sistema SAR.
- 2) Cálculo de la ganancia de procesamiento en alcance G_{NRNG} y de la ganancia de procesamiento en acimut G_{NAZ} del ruido, según se describe en § 5.2.1.
- 3) Cálculo de la ganancia de procesamiento en alcance G_{IRNG} y de la ganancia de procesamiento en acimut G_{IAZ} de la interferencia con arreglo a la forma de onda de la interferencia, según se describe en § 5.2.2.
- 4) En el caso de que $SNR = 0$ dB, la potencia de salida del ruido es igual a la de la señal. Para los criterios de interferencia admisibles $I/N = -6$ dB, la potencia de salida de la máxima señal interferente se obtiene al reducir en 6 dB la potencia de salida del ruido.
- 5) La máxima potencia de entrada admisible de la señal interferente P_I puede determinarse mediante la ecuación (2), sobre la base de los valores de P_N , G_{NRNG} , G_{NAZ} , G_{IRNG} , G_{IAZ} e I/N calculados en las etapas 1 a 4 anteriores.

Por ejemplo, en el caso de un SAR de banda ancha que funcione a 9,6 GHz y reciba interferencia de un radar a bordo de un vehículo espacial, tanto el radar como el SAR utilizan impulsos FM lineales con pendientes de fluctuación muy diferentes. La pendiente de fluctuación del SAR es de 45-450 MHz/ μ s y la pendiente de fluctuación del radar a bordo del vehículo espacial es de 0,5 MHz/ μ s. La relación entre la pendiente de fluctuación interferente y la pendiente de fluctuación del SAR $|\mu'/\mu|$ sólo es de 0,001 a 0,01 y, según se desprende de la Fig. 8, la correspondiente ganancia de procesamiento en alcance es de aproximadamente 2,3 dB. Para una relación admisible $I/N = -6$ dB, $P_N = -83,7$ dBm, $G_{NAZ}/G_{IAZ} = 38$ dB, y $G_{NRNG}/G_{IRNG} = -2,3$ dB, por lo que P_I no debería ser superior a -54 dBm. Habida cuenta de que la ganancia de procesamiento en alcance de la señal es de 44 dB, y el valor de la ganancia de procesamiento en acimut es el doble que el de ruido, la potencia de entrada de la señal mínima deseada puede establecerse en $-165,7$ dBm. En el Cuadro 5 se detallan los resultados correspondientes a los valores de las ganancias del procesador para el ruido, la señal mínima deseada del eco de retorno ($SNR = 0$ dB), y la señal interferente admisible máxima para el caso de un SAR a 9,6 GHz que reciba señales interferentes procedentes de un radar a bordo de un vehículo espacial.

CUADRO 5

**Ganancias de procesamiento en alcance y en acimut para el ruido,
la señal y la interferencia correspondientes a un SAR a 600 MHz que funciona
en modo mapa de bandas a 9,6 GHz, con impulso de 50 μ s**

Tipo de señal	Potencia de entrada (dBm)	Ganancia de procesamiento en alcance (dB)	Ganancia de procesamiento en acimut (dB)	Potencia de salida (dBm)
Ruido	-83,7	0,0	38	-45,7
Señal mínima deseada	-165,7	44	76	-45,7
Máximo nivel aceptable de la señal de radar interferente	-63,5 to -54	2,3	0,0 to 9,5	-51,7

Cabe señalar que, según la ecuación (2), la ganancia de procesamiento SAR no repercute en la interferencia similar al ruido, en particular la interferencia que obedecería a una elevada densidad de transmisores de banda ancha en tierra. En este caso $G_{NAZ}/G_{IAZ} = 0$ dB y $G_{NRNG}/G_{IRNG} = 0$ dB, lo que da lugar a un valor de P_I que no debería superar -89,7 dBm.

5.2.4 Criterios de interferencia

Los criterios para determinar una degradación inaceptable de la calidad de funcionamiento en los SAR de producción de imágenes o de interferometría topográfica pueden calcularse mediante el procedimiento que figura en § 5.2.3.

Estos criterios se aplican a fuentes de interferencia con impulsos no FM con duraciones de impulso de 2 μ s o menos. Para otras duraciones de impulso los criterios varían en sólo $\pm 0,6$ dB.

Cabe señalar que para cada SAR, los criterios de interferencia deben establecerse mediante las características del sistema del SAR de que se trate.

5.2.5 Criterios de disponibilidad

En bandas de frecuencias compartidas, la disponibilidad de datos SAR debe rebasar el 99% para cada emplazamiento de zona de medición escogido.

6 Radares de perfil de nube

Este punto contiene información sobre los criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia de los sensores de radar de perfil de nube a bordo de vehículos espaciales en la banda de frecuencias 94,0-94,1 GHz.

6.1 Criterios de calidad de funcionamiento de los radares de perfil de nube a 94 GHz

El objetivo de una misión de perfilado de nubes a bordo de un vehículo espacial es medir el perfil de reflectividad de todas las nubes dentro del campo de visión con una reflectividad mínima de -35 dBZ.

6.2 Criterios de interferencia de los radares de perfil de nube que funcionan a 94 GHz

La interferencia debería degradar el valor de Z_{min} en menos de un 10% en el 95% de la zona de servicio. La degradación porcentual de Z_{min} corresponde a una relación interferencia/ruido de -10 dB. Este criterio de interferencia corresponde a un nivel de potencia interferente de -160 dBW por encima

de 300 kHz. Cabe señalar que es difícil analizar la interferencia por sus características de dispersión aleatoria para todo el periodo y todas las zonas de observación.

6.3 Criterios de disponibilidad de los radares de perfil de nube

En el caso de las señales interferentes aleatorias, la interferencia debería degradar Z_{min} en menos de un 10% en el 95% de la zona de servicio. Si la señal interferente no es aleatoria, ésta debería degradar Z_{min} en menos de un 10% en el 99% de la zona de servicio prevista. Cabe destacar que es difícil analizar la interferencia debido a su característica de dispersión aleatoria a lo largo de todo el tiempo de observación y en todas las áreas.

7 Zona de medición de interés para la evaluación de la interferencia sistemática

Con objeto de realizar análisis que permitan evaluar la interferencia con respecto a su repercusión en los criterios de disponibilidad de datos sistemáticos del sensor activo es necesario determinar: 1) las dimensiones de la zona de medición; 2) la ubicación de la zona geográfica que debe tenerse en cuenta en las simulaciones; y 3) la forma en que se realiza la medición. El tamaño y la ubicación de la zona geográfica que debe tenerse en cuenta en los análisis de compartición se ha denominado, en su conjunto, «la zona de medición de interés». La forma en que se realiza la medición viene dada por las características operacionales del sensor y el método con el que se utilizan los datos del sensor.

En las bandas de frecuencia compartidas, la disponibilidad de todos los datos de los sensores, a excepción de los radares de precipitación, debe superar el 95% de todas las ubicaciones de la zona de servicio del sensor si la pérdida se produce de forma aleatoria, y el 99% de todas las ubicaciones si la pérdida se produce de forma sistemática en la zona de medición de interés. En el caso de los radares de precipitación, el criterio de disponibilidad de datos para los casos aleatorio y sistemático es del 99,8%.

En lo que respecta a la zona de medición de interés, toda interferencia sistemática que rebase el umbral de interferencia aplicable daría lugar a una pérdida de medición durante el 100% del tiempo para una zona de medición de interés específica.

8 Aspectos relativos a la interferencia transitoria por impulsos

Conviene tener en cuenta que los estudios de compartición y compatibilidad del UIT-R suelen realizarse con arreglo a la potencia media (promedio) del transmisor interferente, en lugar del valor de cresta de la potencia transitoria. En el caso de un sensor activo a bordo de un vehículo espacial que detecta valores de cresta, en particular un altímetro, la utilización de la potencia media del transmisor interferente en lugar del valor de cresta de la potencia transitoria subestimaría el grado de interferencia que afecta a las mediciones del sensor que detecta valores de cresta.

Los sensores activos a bordo de vehículos espaciales que detectan la potencia media de la señal de retorno no se ven afectados de forma adicional por las transmisiones transitorias de símbolos de modulación de potencia superior a la potencia promedio transmitida. Sin embargo, los sensores que detectan valores de cresta de la potencia de la señal de retorno son sensibles a los valores de amplitud de transmisiones transitorias superiores al valor de la potencia promedio de una señal interferente.

8.1 Determinación del valor de cresta de la potencia transitoria para determinados métodos de modulación

La Fig. 9 muestra los resultados de las mediciones CCDF realizadas para los valores de cresta de la potencia de un transmisor DVB-S2 de portadora única⁴ con respecto a cinco métodos de modulación habituales al darse un flujo de datos generado aleatoriamente. Se tuvo en cuenta a tal efecto funcionamiento con transmisión de portadora única.

Se utilizó un filtrado con forma de impulso para la transmisión. Los componentes no lineales y el funcionamiento con varias portadoras no se incluyeron en el análisis. Como cabe esperar, durante el 50% del tiempo el valor de cresta de la potencia es 0 dB superior a la potencia promedio. No obstante, para el 1% del tiempo, cuatro de los cinco métodos de modulación presentan valores de cresta de potencia 4 dB superiores al valor promedio. El valor de cresta de la potencia de impulsos es superior al valor medio en más de 5 dB para todos los métodos de modulación habituales que se muestran en la Fig. 9 y el valor de cresta de la potencia de impulsos es superior al valor de potencia medio en más de 7 dB para MDAP-32 y MAQ-16. A título de ejemplo, en el Cuadro 6 se enumeran los valores de cresta de potencia para los métodos de modulación correspondientes a los niveles del 10%, 1%, 0,1% y 0,01% del tiempo con respecto a los valores de anchura de banda. En dicho Cuadro también se proporciona para cada valor de anchura de banda el número de símbolos por segundo que tendrían lugar para esos valores de potencia de cresta y los niveles de porcentaje de tiempo.

Considérese a título de ejemplo un altímetro que funciona en la banda 13,4-13,75 GHz con muestreo de alrededor de 2 000 ecos de radar por segundo sobre la base de unas 2 000 fluctuaciones. El altímetro detecta la potencia de cresta devuelta. En el Cuadro 6 se muestra el número de símbolos/s con respecto a la potencia de cresta por encima del valor medio esperado para varias modulaciones y velocidades binarias de transmisión. La zona resaltada en amarillo en el Cuadro 6 indica los casos en que el índice de símbolos por segundo de la modulación de transmisión supera el índice de muestreo del altímetro. Al examinar los datos resaltados se deduce que, si se tiene en cuenta el efecto de la potencia de cresta transitoria de los impulsos, cabe aplicar un valor mínimo adicional de potencia de transmisión de interferencia por encima del valor medio.

Ese examen de los efectos de la potencia de cresta en el sensor detector de valores de cresta del altímetro fue restrictivo en cuanto a la estimación de la potencia adicional que debe tenerse en cuenta en los estudios de interferencias. Como se señala en la Fig. 9, los valores de cresta relativos a los símbolos de mayor potencia se producen para índices de frecuencia inferiores al índice de impulsos del altímetro del ejemplo, a saber, de unos 2 000/segundo.

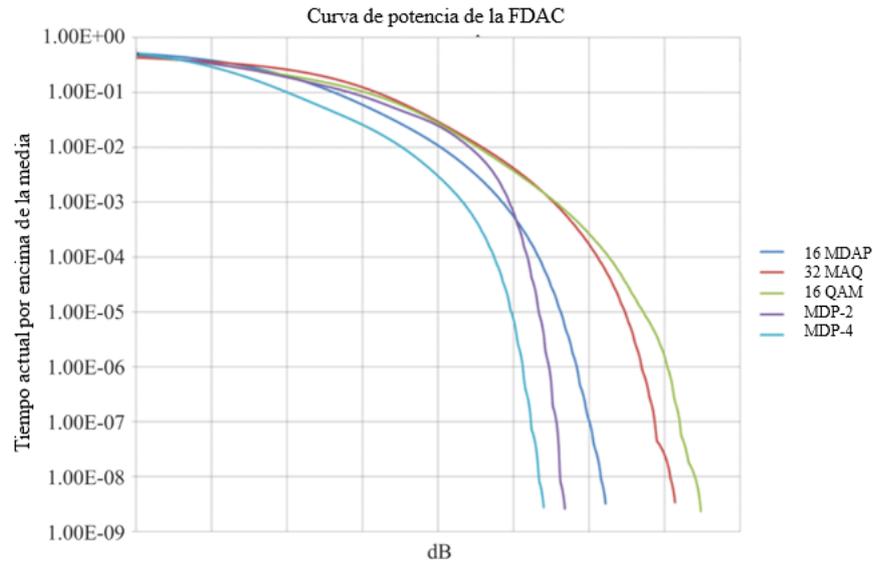
Esos símbolos de mayor potencia también serán detectados por el sensor del altímetro; no obstante, habida cuenta de que esos símbolos de mayor potencia tiene lugar para una frecuencia inferior a la velocidad de muestreo, no afectarán a todas las muestras del altímetro. Un estudio más detallado podría proporcionar un método para tener plenamente en cuenta los efectos de todos los símbolos de mayor potencia en la degradación de las muestras de medición tomadas por los sensores detectores de valores de cresta.

En la Fig. 9 y el Cuadro 6 se proporcionan los resultados de potencia de cresta y porcentaje de tiempo de las modulaciones si se considera transmisión mediante portadora única con funcionamiento de estación terrena del SFS. Si una estación transmisora emplea varias portadoras para transmitir (funcionamiento con varias portadoras), la interacción entre esas portadoras para la misma anchura de banda filtrada del transmisor aumentará la potencia de cresta de los símbolos de forma sustancial con respecto a la de un transmisor de una estación terrena de una única portadora. El examen de la transmisión con varias portadoras en lo que respecta a la potencia de cresta de los símbolos generados requiere la realización de estudios suplementarios.

⁴ Ello conlleva la utilización de un filtro de transmisión de un RRC con .25 alfa (a).

FIGURA 9

FDAC de la potencia de cresta para varios métodos de modulación habituales



RS.1166-09

CUADRO 6

Representación de los valores de potencia de cresta como porcentaje de tiempo y los símbolos/seg. correspondientes para diversos tipos de transmisión del SFS

Velocidad binaria y modulación de la transmisión	10% del tiempo por encima del valor promedio (dB)	Símbolos/s (k)	1% (dB)	Símbolos/s (k)	0,1% (dB)	Símbolos/s (k)	0,01% (dB)	Símbolos/ (k)
580 kHz								
MDAP-16	2,6	232	4,0	23,2	4,8	2,3	5,3	0,2
MDAP-32	3,2	290	4,6	29	5,5	2,9	6,1	0,3
MAQ-16	3,1	232	4,5	23,2	5,6	2,3	6,3	0,2
MDP-2	2,8	58	4,4	5,8	4,9	0,6	5,2	0,1
MDP-4	2,0	116	3,5	11,6	4,3	1,2	4,7	0,1
30,84 MHz								
MDAP-16	2,6	12 336	4,0	1 232	4,8	123,2	5,3	12,4
MDAP-32	3,2	15 420	4,6	1 540	5,5	154,0	6,1	15,5
MAQ-16	3,1	12 336	4,5	1 232	5,6	123,2	6,3	12,4
MDP-2	2,8	3 084	4,4	308	4,9	30,8	5,2	3,1
MDP-4	2,0	6 168	3,5	616	4,3	61,6	4,7	6,2
2,94 MHz								
MDAP-16	2,6	1 176	4,0	117,6	4,8	11,8	5,3	1,2
MDAP-32	3,2	1 470	4,6	147	5,5	14,7	6,1	1,5
MAQ-16	3,1	1 176	4,5	117,6	5,6	11,8	6,3	1,2
MDP-2	2,8	294	4,4	29,4	4,9	2,9	5,2	0,3
MDP-4	2,0	588	3,5	58,8	4,3	5,9	4,7	0,6

En relación con los estudios de compartición del UIT-R sobre sensores activos a bordo de vehículos espaciales para la detección de valores de cresta, cabe examinar la frecuencia de los símbolos de mayor potencia con respecto a la frecuencia de detección del sensor activo a bordo del vehículo espacial a fin de determinar el nivel adicional por encima de la potencia media del transmisor interferente que debe tenerse en cuenta.

9 Parámetros habituales de los sensores del SETS (activo) que pueden utilizarse para determinar los efectos de cada tipo de interferencia

Los parámetros de los cinco tipos de sensores activos a bordo de vehículos espaciales enumerados en el Cuadro 7 pueden utilizarse para evaluar los efectos de varios tipos de interferencia en las mediciones que realiza cada sensor activo. Los valores que figuran en el Cuadro 7 son valores habituales que pueden utilizarse para llevar a cabo una evaluación preliminar; no obstante, los valores reales del sensor activo en la banda de frecuencias objeto de estudio deben utilizarse para realizar un análisis definitivo de los efectos de la interferencia.

CUADRO 7

Parámetros habituales de procesamiento de los sensores del SETS (activo) para la evaluación de los efectos de la interferencia

Tipo de sensor	Detección de potencia de cresta o promedio	Tamaño de la submuestra (ms)	Número de submuestras por muestra	Tamaño de píxel (km ²)	Zona mínima de medición de interés	Medición del ruido de fondo
Altímetro	Valor de cresta	50	100	1 km ²	10 km ² (píxeles consecutivos)	Sí
Dispersímetro	Valor promedio					Sí
Radar de precipitación	Valor promedio					Sí
Radar de apertura sintética (SAR)	Valor promedio					Sí
Radar de perfil de nubes	Valor promedio					Sí