

Unión Internacional de Telecomunicaciones

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R M.1849-1
(09/2015)

**Aspectos técnicos y operacionales de
los radares meteorológicos en tierra**

Serie M

**Servicios móviles, de radiodeterminación,
de aficionados y otros servicios
por satélite conexos**



Unión
Internacional de
Telecomunicaciones

Prólogo

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

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

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

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

Series de las Recomendaciones UIT-R

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

Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión (sonora)
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	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, 2017

© UIT 2017

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 M.1849-1*

Aspectos técnicos y operacionales de los radares meteorológicos en tierra

(2009-2015)

Cometido

Esta Recomendación aborda las características técnicas y de funcionamiento más importantes de los radares meteorológicos, describe los productos conexos proporcionados, destaca sus principales especificidades, discute los efectos de la interferencia sobre los radares meteorológicos y desarrolla los correspondientes criterios de protección contra la interferencia. El texto se limita a los radares meteorológicos en tierra y no incluye los radares de perfil del viento, que también se utilizan a efectos meteorológicos y que quedan cubiertos en otra Recomendación del UIT-R.

Palabras clave

Radar, meteorológico, protección

Abreviaturas/Glosario

CASA	Centro para la teledetección adaptativa conjunta de la atmósfera (<i>Centre for collaborative adaptive sensing of the atmosphere</i>)
GC	Ocupación del suelo (<i>Ground clutter</i>)
P_d	Probabilidad de detección (<i>Probability of detection</i>)
PRF	Frecuencia de repetición de impulsos (<i>Pulse repetition frequency</i>)
PRT	Tiempo de repetición de impulsos (<i>Pulse repetition time</i>)
SAR	Radar v de apertura sintética (<i>Synthetic aperture radar</i>)
VAD	Presentación de acimut vertical (<i>Vertical azimuth display</i>)
VCP	Diagrama de cobertura de volumen (<i>Volume coverage pattern</i>)
WTC	Eco de turbinas eólicas (<i>Wind turbine clutter</i>)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que las características del radar relativas a la antena, a la propagación de la señal, a la detección del blanco y a la gran anchura de banda necesaria para realizar sus funciones son óptimas en ciertas bandas de frecuencias;
- b) que se necesitan unas determinadas características técnicas y de funcionamiento representativas de los radares meteorológicos para determinar la posibilidad de introducir nuevos tipos de sistemas en bandas de frecuencias en los que funcionan los radares meteorológicos;
- c) que se necesitan procedimientos y metodologías para analizar la compatibilidad entre los radares meteorológicos y los otros servicios a que está atribuida la banda de frecuencias;
- d) que las características técnicas y de funcionamiento de los radares meteorológicos son específicas comparadas con otros tipos de radar y justifican una Recomendación UIT-R separada;

* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

- e) que los radares meteorológicos funcionan principalmente en las bandas de frecuencias 2 700-2 900 MHz, 5 250-5 725 MHz y 9 300-9 500 MHz;
- f) que los radares meteorológicos son estaciones de observación fundamentales utilizadas para realizar predicciones meteorológicas y supervisar el medio ambiente;
- g) que los radares meteorológicos desempeñan un papel fundamental a la hora de proporcionar avisos de condiciones climatológicas severas inminentes, tales como inundaciones, ciclones, tifones y huracanes, que pueden poner en peligro a la población y dañar infraestructuras económicas estratégicas;
- h) que la aplicación de criterios de protección exige considerar la inclusión del carácter estadístico de los criterios y otros elementos de la metodología para llevar a cabo los estudios de compatibilidad (por ejemplo, sistema de exploración de la antena y pérdidas en el trayecto de propagación). En futuras revisiones de esta Recomendación pueden incluirse nuevos desarrollos de estas consideraciones estadísticas, según el caso,

reconociendo

- a) que el número **5.423** del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) señala que los radares meteorológicos instalados en tierra en la banda de frecuencias 2 700-2 900 MHz están autorizados a funcionar sobre una base de igualdad con las estaciones del servicio de radionavegación aeronáutica;
- b) que el número **5.452** del RR señala que los radares meteorológicos instalados en tierra en la banda de frecuencias 5 600-5 650 MHz están autorizados a funcionar sobre una base de igualdad con las estaciones del servicio de radionavegación marítima;
- c) que el número **5.475B** del RR señala que los radares meteorológicos instalados en tierra en la banda de frecuencias 9 300-9 500 MHz tienen prioridad sobre cualquier otro uso de radiolocalización,

observando

- a) que la Recomendación UIT-R M.1461 también se utiliza como orientación para analizar la compatibilidad entre los radares y los otros servicios a que está atribuida la banda de frecuencias;
- b) que los criterios de protección del radar dependen de los tipos específicos de señales interferentes, tales como las descritas en el Anexo 1,

recomienda

- 1 que al realizar estudios de compartición se consideren los aspectos técnicos y operacionales de los radares meteorológicos descritos en el Anexo 1 y las características que figuran en el Anexo 2;
- 2 que los criterios de protección combinados para los radares meteorológicos en tierra sean una I/N de -10 dB.

Anexo 1

Aspectos técnicos y operacionales de los radares meteorológicos en tierra

1 Introducción

Los radares meteorológicos en tierra se utilizan para la meteorología operacional y la predicción del tiempo, la investigación atmosférica y la navegación marítima y aeronáutica y desempeñan un papel fundamental en los procesos de alerta de fenómenos meteorológicos e hidrológicos inmediatos. Estos

radares también funcionan de manera continua las 24 horas al día. Las redes de radares meteorológicos representan la última línea de detección de eventos climáticos que pueden provocar pérdidas de vida y propiedad a causa de inundaciones repentinas o intensas tormentas.

La teoría de funcionamiento y los productos generados por los radares meteorológicos son muy distintos a los de otros radares. Es importante entender estas diferencias a la hora de evaluar la compatibilidad entre los radares meteorológicos y otros servicios a los que está atribuida la banda de frecuencias. Las características técnicas y operacionales de los radares meteorológicos dan lugar a distintos efectos relativos a la interferencia admisible en comparación con otros sistemas de radar.

2 Resumen

Los radares meteorológicos se utilizan para determinar las condiciones de la atmósfera a fin de efectuar previsiones meteorológicas rutinarias, detectar condiciones climatológicas extremas, detectar vientos y precipitaciones, estimar las precipitaciones, detectar condiciones de congelamiento en aeronaves y prevenir contra situaciones climatológicas extremas en la navegación.

Los radares meteorológicos transmiten impulsos con polarización horizontal que miden la dimensión horizontal de una nube (agua de la nube y hielo de la nube) y la precipitación (nieve, granizo y partículas de hielo y lluvia).

Los radares polarimétricos, también llamados radares de doble polarización, transmiten impulsos con polarización tanto horizontal como vertical. Estos radares proporcionan una mejora significativa en la estimación de la intensidad de lluvia, la clasificación de las precipitaciones, la calidad de los datos y la detección de peligros meteorológicos con respecto a los sistemas no polarimétricos.

Los radares meteorológicos no constituyen un servicio de radiocomunicaciones individual en el UIT-R sino que forman parte del servicio de radiolocalización y/o radionavegación en el RR. La determinación de si se refiere a radiolocalización y/o radionavegación depende de la forma en que se utilice el radar correspondiente. Un radar meteorológico en tierra utilizado para investigación de la atmósfera o previsiones meteorológicas funcionará en el servicio de radiolocalización. Un radar meteorológico a bordo de aeronaves comerciales funcionará bajo el servicio de radionavegación. Un radar meteorológico en tierra también puede explotarse en el servicio de radionavegación si, por ejemplo, se emplea por el control de tráfico aéreo para encaminar las aeronaves en caso de condiciones climatológicas adversas. En consecuencia, los radares meteorológicos pueden funcionar en una gran variedad de bandas de frecuencias atribuidas a los servicios de radiolocalización y radionavegación siempre que su utilización sea coherente con la definición del servicio de radiocomunicaciones. El RR contiene tres referencias específicas a los radares meteorológicos en el Cuadro de atribución de bandas de frecuencias. Las tres referencias figuran en notas asociadas a las bandas de frecuencias 2 700-2 900 MHz (número **5.423** del RR), 5 600-5 650 MHz (número **5.452** del RR) y 9 300-9 500 MHz (número **5.475** del RR).

2.1 Ecuación del radar para un solo blanco¹

Los radares meteorológicos no realizan seguimientos de blancos puntuales. No obstante, la ecuación del radar puede adaptarse para su utilización por estos radares meteorológicos. La cantidad de potencia devuelta tras una exploración de volumen llevada a cabo por un radar meteorológico determina si los fenómenos climatológicos serán detectables. La ecuación de alcance del radar

¹ La información sobre estas ecuaciones y la obtención de las mismas aparece en YAU, M. K. y ROGERS, R. R. [1 de enero de 1989] *A Short Course in Cloud Physics*, Capítulo 11.

expresa la relación entre la potencia devuelta por un blanco y las características del blanco en particular y el radar de transmisión.

El blanco puntual típico tendrá las siguientes variables de la ecuación del radar:

- P_R : potencia recibida por el radar
- P_T : potencia de cresta transmitida por el radar
- A_T : área del blanco
- R : distancia del blanco al radar
- G : ganancia de la antena de transmisión.

Estas variables se combinan para establecer la ecuación general del radar para un blanco puntual:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot r^4} \cdot A_T$$

La anterior ecuación supone radiación isótropa y dispersión isótropa. Sin embargo, la mayoría de los blancos no dispersan la radiación incidente de manera isótropa y, por consiguiente, es necesario contar con la sección transversal de la retrodispersión, σ , del blanco:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \cdot \sigma$$

2.2 Ecuación del radar meteorológico

Una vez obtenida la ecuación para un solo blanco puntual, el siguiente paso es editar la ecuación anterior para incluir los blancos de los radares meteorológicos. Las gotas de lluvia, los copos de nieve y las partículas de nube son ejemplos de una importante clase de blancos de radar, conocidos como blancos distribuidos.

Los impulsos de radar incidentes crean el volumen de resolución transmitido del radar meteorológico iluminando simultáneamente el volumen que contiene las partículas de precipitación. La potencia media recibida de los blancos de precipitación da lugar a la siguiente ecuación, donde $\Sigma\sigma$ es la suma de las secciones transversales de retrodispersión de todas las partículas que se encuentran en el interior del volumen de resolución.

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \cdot \left(\sum_n \sigma \right)$$

Como el volumen del haz del radar continúa aumentando al incrementarse la distancia, el haz del radar incluye cada vez más blancos. El volumen definido del haz del radar es equivalente a:

$$V = \pi \left(\frac{r \cdot \theta}{2} \right)^2 \cdot \frac{h}{2}$$

donde $h = c\tau$ es la longitud del impulso y θ es la anchura de haz de la antena. Combinando la ecuación general del radar con el volumen del haz del radar, se obtiene como sigue la potencia media devuelta:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \cdot \pi \left(\frac{r \cdot \theta}{2} \right)^2 \cdot \frac{h}{2} \eta$$

siendo η la reflectividad del radar por unidad de volumen. Sin embargo, en la anterior ecuación se ha supuesto que la ganancia de antena es uniforme en sus límites de 3 dB, lo cual no es cierto. Suponiendo un diagrama de haz Gaussiano, el volumen efectivo se define de forma más adecuada mediante el diagrama del haz del radar en vez de en el interior de los límites de 3 dB. Utilizando un diagrama de haz Gaussiano, la potencia media devuelta pasa a ser:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \theta^2 \cdot h}{1024 \pi^2 \cdot \ln(2)} \frac{\eta}{r^2}$$

Considerando una sola partícula esférica de pequeño tamaño comparada con la longitud de onda del radar, puede representarse la sección transversal de retrodispersión mediante la fórmula $\sigma = 64\pi/\lambda^4 |K|^2 r_o^2$, siendo K el índice de refracción complejo y r_o el radio de la esfera. Las partículas de precipitación que son lo suficientemente pequeñas como para poder aplicar la ley de dispersión de Rayleigh se conocen con el nombre de dispersores de Rayleigh. Las gotas de lluvia y los copos de nieve se consideran dispersores de Rayleigh medidos con aproximación precisa cuando la longitud de onda del radar se encuentra entre 5 cm y 10 cm, que es la longitud de onda de funcionamiento común de la mayoría de los radares meteorológicos. Para una longitud de onda de 3 cm, puede seguir siendo útil la dispersión aproximada, pero es menos precisa.

Para un grupo de gotas esféricas, pequeñas en comparación con la longitud de onda del radar, la potencia media devuelta pasa a ser:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot r^4} 64 \frac{\pi^5}{\lambda^4} (|K|)^2 \cdot \left(\sum_n r_o^6 \right)$$

donde Σ es un sumatorio del radio esférico para cada uno de los dispersores de precipitación. Haciendo $(D/2)^6$ igual r_o^6 , la potencia media devuelta puede reflejarse en términos de diámetros de gota para dispersores esféricos:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \frac{\pi^5}{\lambda^2} K^2 \cdot \left(\sum_n D^6 \right)$$

Por consiguiente, para dispersores esféricos considerablemente más pequeños que la longitud de onda del radar, la potencia media recibida por el radar meteorológico se determina mediante las características del radar, el alcance, el índice de refracción del dispersor ($|K|^2$) y el diámetro del dispersor (D^6).

Por último, el factor de reflectividad del blanco, Z , puede expresarse como $Z = \Sigma_V D^6 = \int N(D)D^6 dD$, siendo Σ_V el sumatorio a lo largo de una unidad de volumen y $N(D)D^6$ el número de dispersores por unidad de volumen. La forma final de la ecuación de radar para radares meteorológicos, incluidas las correcciones introducidas previamente para representar un diagrama de haz Gaussiano, pasa a ser:

$$P_R = \frac{\pi^3 c}{1024 \cdot \ln(2)} \left(\frac{P_T \cdot G^2 \theta^2 \tau}{\lambda^2} \right) \cdot \left[(|K|^2) \cdot \frac{Z}{r^2} \right]$$

3 Principios generales de los radares meteorológicos

Los radares meteorológicos llevan a cabo fundamentalmente dos tipos de mediciones:

- mediciones de precipitación;

– mediciones de viento.

Estas mediciones se realizan en una rejilla de píxeles que permiten una presentación cartográfica de los eventos meteorológicos antes indicados.

3.1 Ejemplo de funcionamiento de radar meteorológico en la banda de frecuencias 2,7-2,9 GHz

El radar 1 del Anexo 2, Cuadro 1, es un sistema representativo de radares meteorológicos que funcionan en frecuencias en torno a 2,8 GHz. La curva de 0 dBz para este radar intersecta el nivel de ruido del receptor (−113 dBm) a una distancia de 200 km.

3.1.1 Estimación de la precipitación

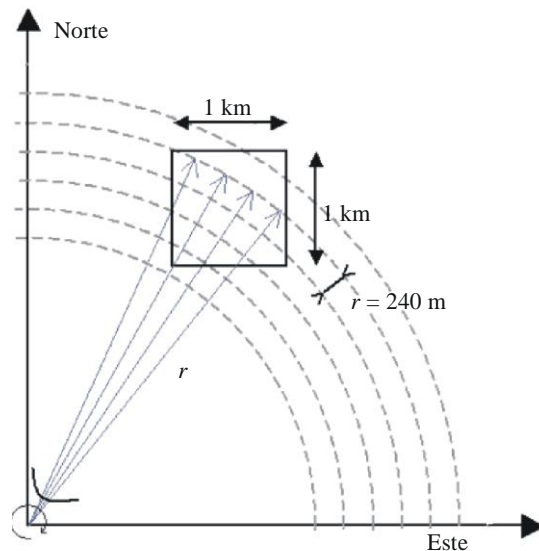
Los radares representativos que funcionan cerca de 2,8 GHz utilizan una variedad de fórmulas reflectividad-alcance (Z-R) y reflectividad-intensidad de lluvia (Z-S) para estimar la precipitación. Dependiendo del algoritmo específico, puede variar el efecto de la interferencia sobre el alcance operacional.

Ejemplo de funcionamiento de radar meteorológico en la banda de frecuencias 5,6-5,65 GHz

Normalmente, la cobertura del radar se extiende más allá de los 200 km, presentando una resolución de píxeles de 1 km × 1 km. En algunos casos, se presenta una rejilla más detallada de 250 m × 250 m píxeles.

Para cada píxel, las mediciones del radar se calculan a lo largo de todas las respuestas al impulso correspondientes a este píxel; es decir, para cada par de impulsos y cada ventana de distancia, y a continuación proyectándolo directamente en una rejilla de coordenadas Cartesianas (véase la Fig. 1).

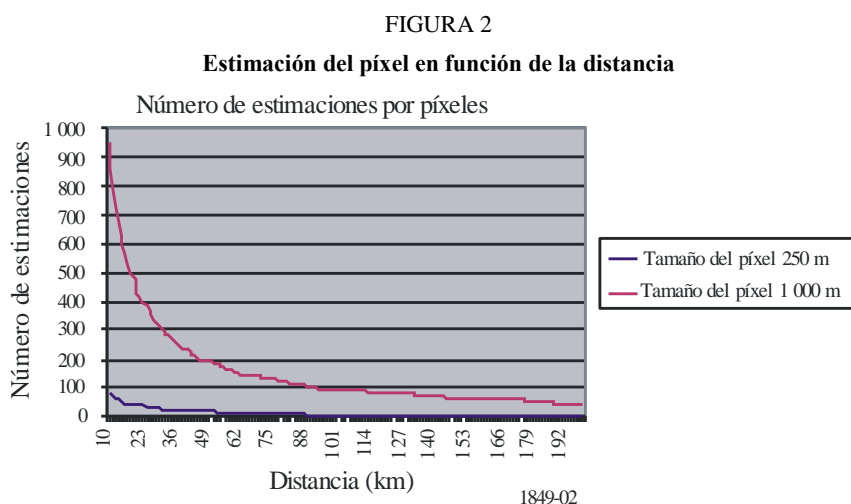
FIGURA 1
Proyección Cartesiana de par de impulsos y ventana de distancia



1849-01

En consecuencia, el número de estimaciones por píxel varía de acuerdo con la distancia. Estos números están relacionados con la frecuencia de repetición de impulsos (PRF) media y la velocidad de rotación de la antena. Por término medio, con una velocidad de rotación de la antena típica de 6 grados/s, una PRF media de 333 Hz y una separación de ventanas de 240 m, se obtiene para 10 y 100 km unas 1 000 y 100 estimaciones, respectivamente, para un píxel de 1 km².

La Fig. 2 representa un cálculo simplificado de dicho número de estimaciones en función de la distancia para píxeles de 250 m × 250 m y 1 km × 1 km, lo que confirma que las mediciones del radar son más sensibles a distancias elevadas así como para píxeles más pequeños.

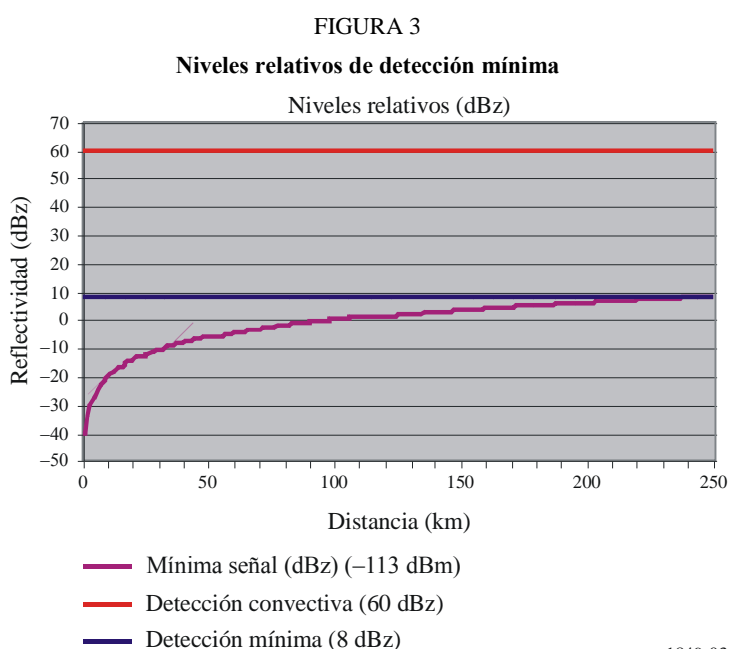


3.1.2 Principio de mediciones de la precipitación

Los radares meteorológicos llevan a cabo mediciones de la precipitación que se expresan en la reflectividad (dBz). A continuación se indican los principios de estas mediciones, basándose en un ejemplo de un diseño de radar en particular. Otros diseños de radar funcionarán de forma similar, pero los niveles de señal variarán según el diseño.

Los radares instalados en una red de una administración se calibran para que coincidan con el nivel de ruido del receptor (es decir aproximadamente -113 dBm) con un nivel de reflectividad de 0 dBz a 100 km. Además, el mínimo nivel de detección de una célula de lluvia se fija a 8 dBz.

La Fig. 3 presenta los niveles relativos (dBz) de la detección mínima (8 dBz) de una célula convectiva significativa (60 dBz) y el nivel equivalente de ruido del receptor.



La relación entre potencia y la reflectividad viene dada por la siguiente fórmula:

$$P = \frac{Cz}{r^2}$$

siendo:

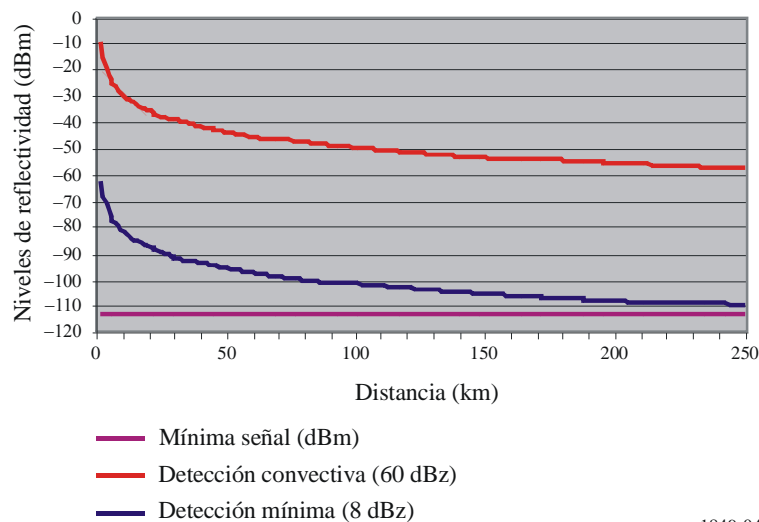
- P : potencia (mW)
- C : constante (aproximadamente 10^{-7} ó -70 dB)
- z : reflectividad
- r : distancia (km)

con lo que se obtiene (dB) la siguiente fórmula:

$$\text{dBm} = \text{dBz} + C - 20 \log I$$

Basándose en ello, la Fig. 4 proporciona (dBm) los niveles de recepción correspondientes a los niveles de reflectividad de la Fig. 3.

FIGURA 4
Niveles relativos (dBm) correspondientes a niveles de reflectividad y distancia



1849-04

Por último, las cifras de reflectividad se trasladan a niveles de precipitación utilizando la siguiente fórmula (para lluvia típica):

$$R_{(\text{mm/h})} = \left(\frac{z}{200} \right)^{\left(\frac{1}{1,6} \right)}$$

Cabe señalar que esta fórmula de traslación es válida para tasa de precipitación típica ($a = 1,6$) pero se han definido otras fórmulas para distintos tipos de precipitación (lluvia tropical, nieve, granizo, etc.) en las que el valor de a debería ajustarse de la manera correspondiente.

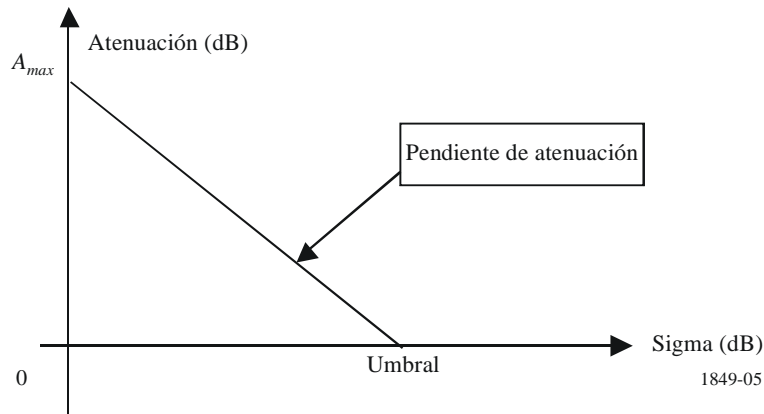
Para un píxel concreto de la rejilla del radar, se consideran las cifras de reflectividad para cada estimación (correspondientes a una respuesta al impulso y una ventana) para determinar los siguientes elementos:

- la media (dBz) a lo largo de todas las estimaciones;
- la desviación típica.

Las respuestas de la célula de lluvia se caracterizan por una cierta variabilidad que se utiliza para discriminarlas del eco parásito, utilizando el valor de desviación típica.

En los radares instalados en una administración los valores de reflectividad se corrigen, por consiguiente, utilizando el siguiente algoritmo:

FIGURA 5
Pendiente de atenuación



$$\text{Si } (\sigma \leq \text{Umbral}) \Rightarrow Z_{aeef} = Z_{seef} - (\text{Umbral} - \sigma) * \text{Pendiente}$$

$$\text{De no ser así} \Rightarrow Z_{aeef} = Z_{seef}$$

σ : desviación típica (dB)

Z_{seef} : valor de la reflectividad antes de la corrección

Z_{aeef} : valor de la reflectividad después de la corrección.

La pendiente de atenuación representada en la Fig. 5 viene dada por:

$$\text{Pendiente} = \frac{A_{m\acute{a}x}}{\text{Umbral}}$$

En aplicaciones operacionales, los valores del umbral y la pendiente se definen de manera que garanticen que casi no hay atenuación de las señales meteorológicas (en realidad menos del 5%), actualmente fijada, basándose en experimentos, a 20 dB para la pendiente y en la gama 2,3-2,7 dB para el umbral sigma. Por último, cabe señalar que cuando la atenuación calculada supera los 25 dB, la reflectividad resultante se fija a 0.

3.2 Principios de mediciones del viento

A diferencia de la reflectividad (dBz), que es una medida de la intensidad de la señal, las mediciones del viento se basan en la detección Doppler realizada en la fase y el tipo de fase de la señal y pueden tener lugar tan pronto como la señal recibida supera el nivel de ruido (es decir, -113 dBm).

Para evitar la detección de fase que puede causar la variación del ruido o las fuentes no meteorológicas, se considera un umbral de 3 dB sobre el ruido (es decir, -110 dBm) en algunos

radares, mientras que otros radares meteorológicos son capaces de procesar niveles de S/N hasta valores comprendidos entre -3 dB y -6 dB.

Cabe señalar igualmente que dichas mediciones se llevan a cabo en condiciones de lluvia y de cielo despejado. En el primer caso, los niveles de recepción son similares a los descritos por la Fig. 2 mientras que en condiciones de cielo despejado, puede observarse fácilmente que los niveles de reflectividad correspondientes son muy bajos y no permitirían realizar mediciones de viento a distancias superiores a unos 30 a 50 km.

Para cada estimación (correspondiente a una respuesta al impulso y una ventana), las cifras de fase y reflectividad se consideran como un vector y, para un píxel determinado de la rejilla del radar, el vector de viento resultante se obtiene como la combinación de todos los vectores sencillos.

Ello significa que la fase de cada estimación se equilibra con el correspondiente módulo de reflectividad y que una sola estimación que presenta una elevada reflectividad (es decir el vector módulo) puede controlar la medición del píxel.

Las mediciones del viento se utilizan para obtener dos conjuntos distintos de productos del viento:

- la velocidad radial en la rejilla del radar, similar a la pantalla de precipitación;
- la presentación de acimut vertical (VAD), en la cual el conjunto de los datos (para todas las altitudes) en un radio de unos pocos kilómetros o unas pocas decenas de kilómetros se integra para calcular el perfil del viento en dirección vertical al radar.

3.3 Ejemplo de funcionamiento de radar meteorológico en partes de la gama de frecuencias 8,5-10,5 GHz

Los radares meteorológicos que funcionan en partes de la gama de frecuencias 8,5-10,5 GHz (es decir, en longitudes de onda de 2,5 cm a 4 cm) pueden detectar partículas más pequeñas. Estos radares meteorológicos generalmente se emplean para estudios sobre desarrollo de nubes debido a su capacidad para detectar partículas de agua muy pequeñas y precipitación muy ligera. Tienen un alcance típico de 30 km para blancos de precipitación de 10 dBz y funcionan con unos niveles de potencia relativamente baja (por ejemplo, 12 kW).

Las redes de radares que funcionan en partes de la gama de frecuencias 8,5-10,5 GHz también se están investigando como un medio para complementar los actuales sistemas de radares meteorológicos detectando señales precursoras de fenómenos meteorológicos severos.

«Un inconveniente de utilizar radares que funcionan en partes de la gama de frecuencias 8-12 GHz para detección de fenómenos meteorológicos es el volumen de atenuación de señal que puede experimentarse debido a la lluvia. Esta atenuación es especialmente severa en caso de lluvia moderada a intensa, donde el factor de reflectividad es mayor de 40 dBz. Mientras el radar pueda obtener una señal detectable a pesar de la atenuación, pueden realizarse mediciones de velocidad y pueden aplicarse estimaciones de la tasa de atenuación para corregir los valores de reflectividad. Las mediciones polarimétricas dobles pueden ser especialmente eficaces para corregir la atenuación. (Por ejemplo, Lim y Chandrasekar, 2005).»

Una vez que la señal atenuada cae por debajo del valor de sensibilidad del radar, no pueden obtenerse mediciones de la velocidad. Cuando no se dispone de estas mediciones queda muy comprometida la capacidad del radar para detectar condiciones meteorológicas peligrosas.

Será preciso realizar estudios analíticos adicionales y mediciones de campo para cuantificar las repercusiones de la interferencia localizada sobre estos sistemas y determinar la magnitud de los niveles de I/N requeridos para proteger estos sistemas.

4 Comparación de radares meteorológicos con otros radares

La mayoría de los radares se utilizan para la detección y seguimiento de los blancos puntuales que se encuentran dentro del alcance de detección del radar. En comparación, los radares meteorológicos no se concentran en la detección de blancos discretos. Miden toda la atmósfera en torno al radar. Se procesan los retornos procedentes de cada intervalo a lo largo de cada radial para proporcionar una medición completa de la atmósfera, lo que normalmente se denomina exploración de volumen. Por esta razón, generalmente no se emplea el término probabilidad de detección (p_d) para caracterizar los radares meteorológicos. De hecho, una ausencia de retorno de señal también constituye información para el usuario de datos pues indica que existen unas condiciones atmosféricas despejadas.

Como señala el término exploración de volumen, el radar realiza una exploración del volumen atmosférico para crear una representación completa de las condiciones atmosféricas. Si bien muchos tipos de radares realizan un seguimiento de blancos discretos para obtener información (velocidad, sección transversal del radar, etc.) a partir de las características de los impulsos de retorno, son estas características las que utiliza un radar meteorológico para proporcionar casi toda la información. A menos que el cielo esté absolutamente despejado, los radares meteorológicos reciben y procesan retornos de casi todos los intervalos a lo largo de un radial.

Los criterios para la evaluación operacional de un sistema de radar meteorológico típico incluyen:

- a) aspectos técnicos;
- b) características de los avisos, y
- c) calidad y fiabilidad de los productos derivados.

Los aspectos técnicos incluyen factores tales como cobertura a altitudes específicas, resolución espacial y temporal, sensibilidad, cobertura Doppler y disponibilidad del radar. Las características del aviso pueden considerarse como una medida objetiva pero, de hecho, están directamente vinculadas con la capacidad de detección. La calidad y fiabilidad de los productos derivados fundamentales (reflectividad, velocidad radial media y anchura espectral) tienen influencia sobre la capacidad de proporcionar avisos de condiciones meteorológicas peligrosas y previsiones meteorológicas oportunas y precisas.

4.1 Especificidades con respecto a los criterios de protección

En el caso de radares que realizan seguimientos de blancos discretos, se supone aceptable un valor de $I/N = -6$ dB, lo que da lugar a una reducción del 6% del alcance de detección. De hecho, la señal recibida por estos radares es proporcional a $1/r^4$ (siendo r la distancia), y por consiguiente la distancia en el espacio libre obtenible es proporcional a la 4ª raíz de la relación S/N resultante. Una $I/N = -6$ dB corresponde a un incremento de 1 dB en la potencia de ruido y un factor de 1,26 en potencia. Por lo tanto, el alcance en el espacio libre resultante se reduce por un factor de $1/(1,26^{1/4})$, o 1/1,06; es decir, una reducción en la capacidad de alcance de aproximadamente el 6%.

Para los radares meteorológicos, la situación es distinta en el caso de blancos ampliados ya que normalmente la precipitación ocupa todo el haz estrecho del radar. Utilizando la ecuación del radar desarrollada en el § 2.2, los blancos ampliados dan lugar a una señal recibida proporcional a $1/r^2$ y un alcance en espacio libre proporcional a la raíz cuadrada de la relación S/N resultante. En tales casos, una reducción similar de la capacidad de alcance del 6% aceptable para los radares meteorológicos requiere un factor de interferencia de potencia de 1,12 (en vez de 1,26 para otros tipos de radar), lo que corresponde a un incremento del ruido de 0,5 dB y da lugar a una $I/N = -10$ dB.

En el § 8 aparece una detallada justificación de este criterio.

4.2 Especificidades con respecto a esquemas de emisión y estrategias de exploración

Para garantizar el procesamiento en la exploración del volumen (normalmente en una gama de 15 minutos), los radares meteorológicos utilizan una cierta variedad de esquemas de emisión distintos a diferentes elevaciones empleando conjuntos de diversas anchuras de impulso, PRF y velocidades de rotación, en lo que se denomina «estrategias de exploración». Desafortunadamente no hay esquemas típicos ya que varían basándose en un cierto número de factores tales como las capacidades del radar y el entorno del radar para los productos meteorológicos requeridos.

Esto se ha confirmado realizando una encuesta sobre los radares meteorológicos en la banda C en Europa que ha demostrado la existencia de amplias gamas de parámetros de esquemas de emisión distintos:

- Elevación operacional entre 0° y 90° .
- Anchuras de impulso entre $0,5$ y $2,5 \mu\text{s}$ (para radares operacionales). Los radares existentes son capaces de trabajar con impulsos de anchura de hasta $3,3 \mu\text{s}$ para impulsos sin comprimir, mientras que algunos radares utilizan compresión de impulsos con una anchura de impulso de unos $40 \mu\text{s}$ que se espera aumentar hasta $100 \mu\text{s}$ en el futuro.
- Frecuencia de repetición de impulsos (PRF) entre 250 y $1\,200$ Hz (para radares operacionales). Los radares existentes son capaces de funcionar con una PRF de hasta $2\,400$ Hz.
- Velocidad de rotación entre 1 y 6 rpm.
- Utilización en un radar determinado de distintos esquemas de emisión que combinan diferentes anchuras de impulso y PRF y, en particular, la utilización de PRF fija, escalonada o entrelazada (es decir, distintas PRF dentro de un solo esquema).

A continuación se representan algunos ejemplos de estos diferentes esquemas de emisión:

FIGURA 6

PRF fija

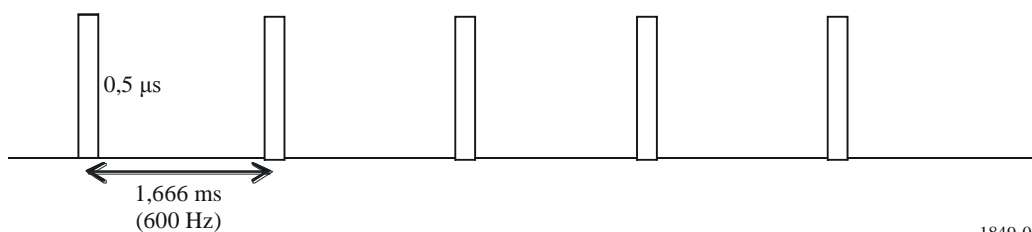
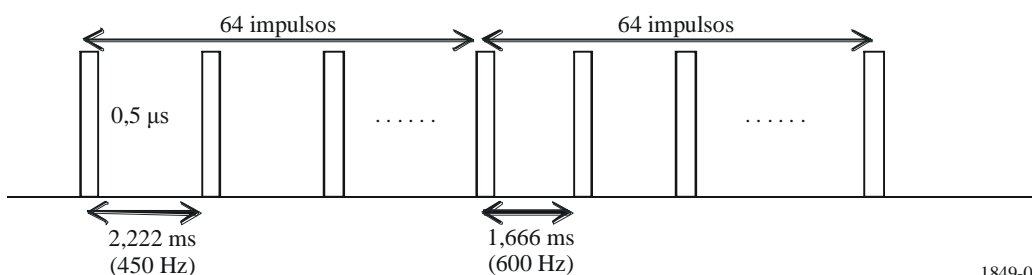
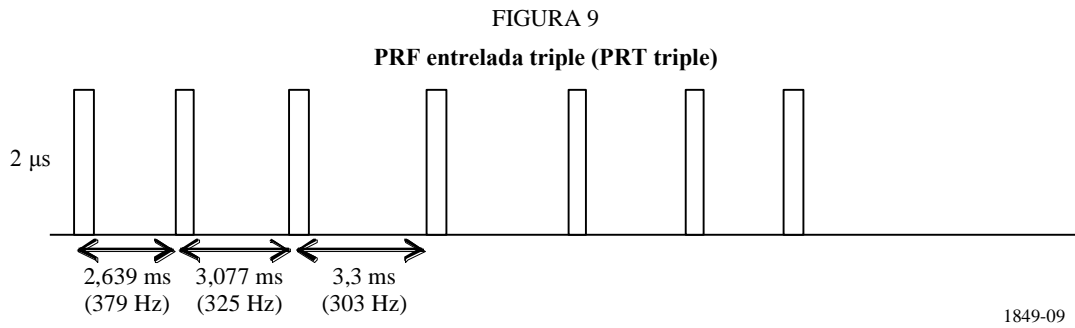
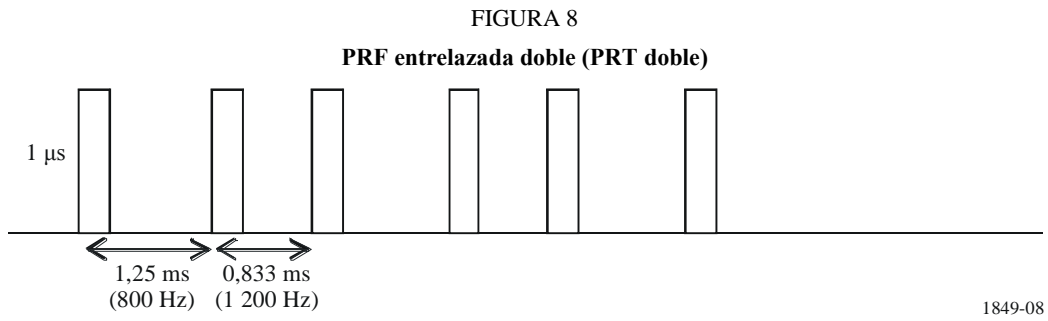


FIGURA 7

PRF escalonada





Estos diferentes esquemas de emisión se utilizan en un cierto número de radares como estrategia de exploración, durante la cual se transmite un esquema de emisión para distintas elevaciones y velocidades de rotación.

Hay que destacar que de un radar a otro, los valores de PRF y de anchura del impulso asociados con estos ejemplos de esquema varían en las gamas definidas anteriormente. Además, para un esquema determinado, las anchuras del impulso pueden variar de un impulso a otro.

A continuación figura un ejemplo de estrategia de exploración:

FIGURA 10

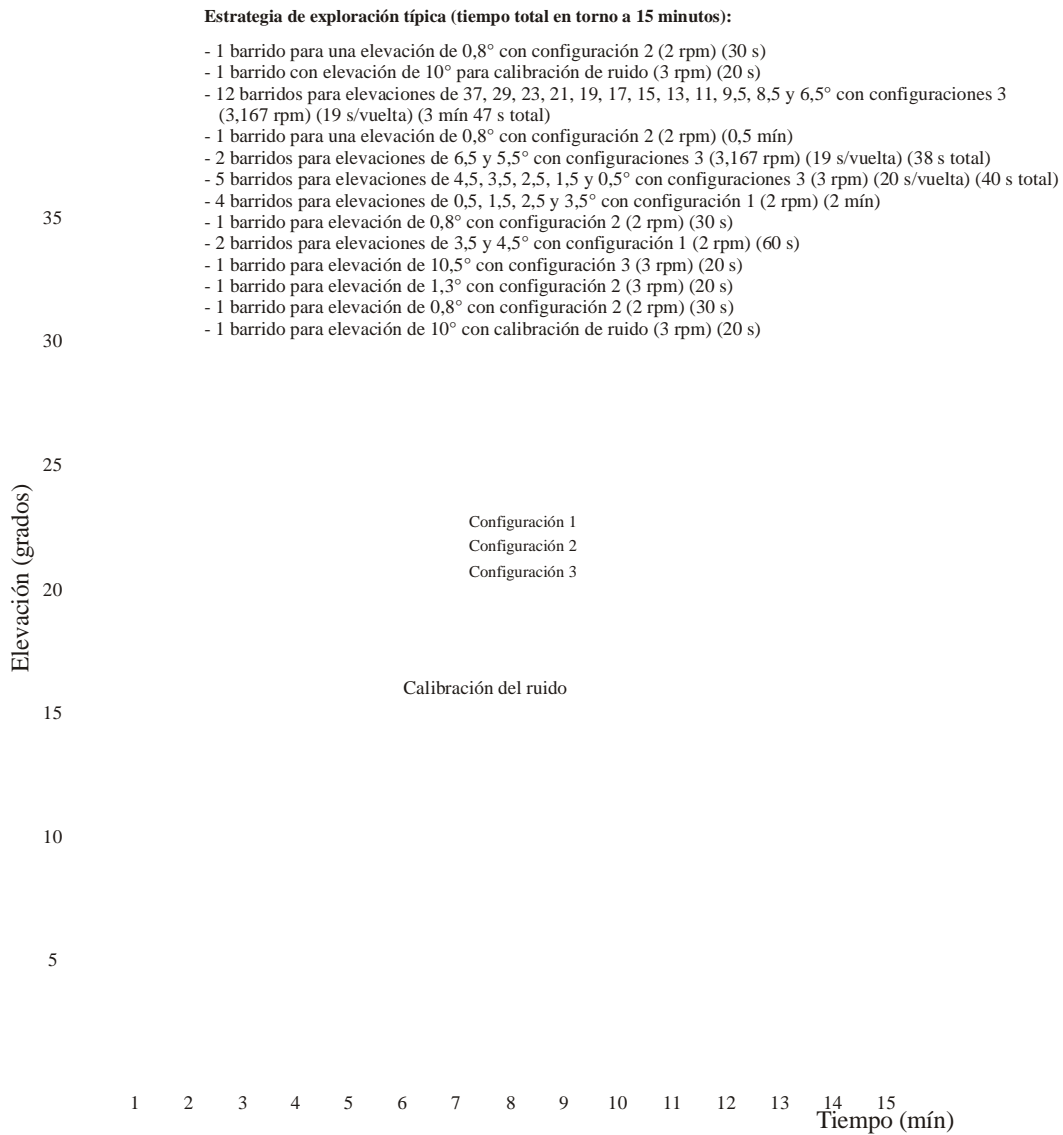
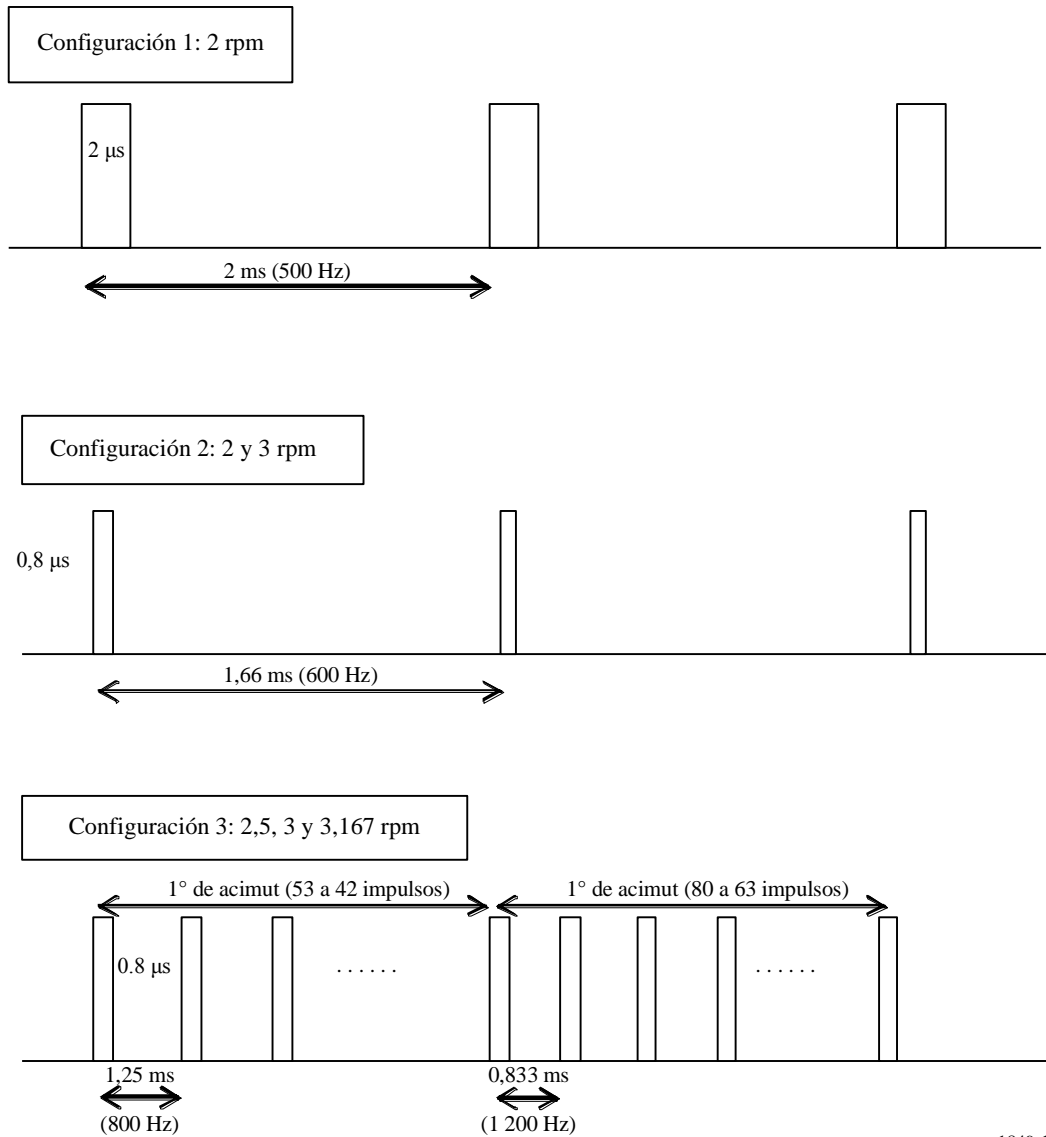


FIGURA 11



1849-11

4.3 Especificidades relativas a la calibración del ruido

Considerando la debilidad de la señal de retorno a los radares meteorológicos, el nivel de ruido debe extraerse de la señal para lograr mediciones más precisas y recuperar los productos meteorológicos pertinentes.

Siendo N el nivel de ruido y S la señal útil (es decir, el retorno de la señal meteorológica), los radares meteorológicos llevan a cabo el siguiente proceso:

- 1) Para cada ventana, el radar mide la señal de retorno correspondiente a la señal útil (S) y al ruido (N), es decir $N + S$.
- 2) Para obtener S , el radar extrae de $N + S$ el nivel de ruido, N .
- 3) A continuación, a partir de S (dBm), el radar puede determinar todos los parámetros meteorológicos tales como la precipitación (obtenida a partir del factor de reflectividad (dBz)) o la velocidad del viento, mediante análisis Doppler.

Para obtener los parámetros meteorológicos más precisos, la señal S debe ser lo más precisa posible, lo que significa que es fundamental lograr una adecuada calibración del ruido del radar.

Esta calibración del ruido, también denominada «Verificación cero» se lleva a cabo por tanto de manera periódica, ya sea durante las emisiones regulares del radar (por estimación) o durante periodos específicos de tiempo (véase el ejemplo de estrategia de exploración) durante los cuales se mide el ruido.

En muchos casos, esta medición del ruido se realiza sin ninguna emisión del radar (en particular esto tendría repercusiones en el diseño de ciertos sistemas radioeléctricos destinados a detectar la señal del radar para reducir la interferencia).

En todos los casos, la interferencia recibida durante la calibración para comprobación del ruido perturbará toda la recopilación de datos hasta que se efectúe la siguiente calibración sin interferencia.

5 Modos operacionales para radares meteorológicos

El típico radar meteorológico Doppler funciona en dos modos seleccionables: modo en cielo despejado y modo en precipitación. El primero exige una selección manual por parte del usuario. El modo precipitación puede seleccionarse manualmente en cualquier instante durante el funcionamiento o puede accionarse automáticamente siempre que el radar meteorológico detecte precipitación (basándose en unos valores predeterminados y en una cobertura de zona de reflectividad). Por regla general, los radares meteorológicos aprovechan ambos modos.

5.1 Modo en cielo despejado

El modo en cielo despejado proporciona a los radares meteorológicos la posibilidad de detectar signos tempranos de actividad de precipitación.

Existen ciertas variables en la velocidad de bajo nivel y la densidad del aire que permiten detectar la posibilidad de precipitación. El radar utiliza una velocidad de exploración lenta junto con una frecuencia de repetición de impulsos (PRF) baja para lograr una capacidad de alta sensibilidad. Esta alta sensibilidad es ideal para detectar los pequeños cambios en las condiciones atmosféricas a largas distancias. El modo en cielo despejado es especialmente útil cuando hay poca o ninguna actividad convectiva en la gama de transmisión del radar y se adapta idealmente a la detección de signos que indican que se está desarrollando una tormenta u otros tipos de fenómenos climatológicos severos.

La elevada sensibilidad del radar meteorológico se debe al diagrama de exploración de volumen en el modo en cielo despejado. Seleccionando un diagrama en el modo cielo despejado, la antena del radar es capaz de permanecer durante un amplio periodo de tiempo en cualquier volumen de espacio determinado y recibir múltiples señales de retorno permitiendo a la vez el funcionamiento con un bajo nivel de S/N . La utilización de una anchura de impulso amplia y una baja PRF proporciona aproximadamente una potencia de eco de 8 dB para un dBz determinado de reflectividad.

5.2 Modo precipitación

El modo precipitación tiene un objetivo distinto que el modo en cielo despejado. La velocidad de exploración en modo precipitación es función del ángulo de elevación. Esta dependencia permite el mayor número posible de ángulos de elevación en el muestreo del volumen de radar total. El modo precipitación aprovecha los diagramas de cobertura de volumen para implementar distintos tipos de estrategias de exploración (véase un ejemplo en el § 4.2) con distinto muestreo de elevación. Los fenómenos meteorológicos supervisados normalmente en modo precipitación van asociados con el desarrollo de precipitaciones en que intervienen tormentas convectivas (lluvias torrenciales, granizo, tormentas severas, tornados, etc.) y sistemas sinópticos a gran escala.

6 Productos de datos de radar meteorológico

Para ofrecer una mejor comprensión de los radares meteorológicos a efectos de análisis de interferencia y gestión del espectro, hay que considerar dos categorías de productos de datos de radar meteorológico: productos de datos de base y productos de datos derivados.

6.1 Productos de datos de base de radar meteorológico convencional

Un radar meteorológico Doppler genera tres categorías de productos de datos de base a partir de los retornos de señal: reflectividad de base, velocidad radial media y anchura del espectro. Todos los productos de nivel más elevado se generan a partir de estos tres productos de base. La precisión del producto de base se especifica a menudo como un requisito de calidad fundamental para el diseño del radar. Sin la precisión requerida a este bajo nivel, no puede lograrse la precisión del producto derivado a nivel más elevado. En un previo estudio realizado por el UIT-R sobre radares meteorológicos, la influencia de la interferencia permisible sobre los datos del producto de base se utilizó para establecer los criterios de protección. Por ejemplo, se empleó un radar representativo con las precisiones de datos de base que aparecen en el Cuadro 1 en un estudio destinado a determinar la relación interferencia/ruido que hacía que el radar no satisficiera sus requisitos de diseño. En el punto 8.3 y en el Anexo 1 al Informe UIT-R M.2136 se abordan los detalles para determinar los criterios de protección del radar meteorológico.

CUADRO 1

Radar meteorológico representativo (2 700-2 900 MHz) requisitos de precisión de los datos de base

Producto de datos de base	Requisito de precisión de diseño
Reflectividad de base	< 1 dB
Velocidad radial media	< 1 m/s
Anchura de espectro	> 1 000 Hz

6.1.1 Reflectividad de base

La reflectividad de base se utiliza en múltiples aplicaciones de radares meteorológicos, la más importante de las cuales es la estimación de la intensidad de lluvia. La reflectividad de base es la intensidad de los impulsos de retorno y se calcula a partir del valor medio lineal de la potencia de retorno. Cualquier interferencia al radar se suma a la potencia del impulso de retorno y afecta a los valores de la reflectividad. Las mediciones de reflectividad pueden verse comprometidas si el error rebasa los requisitos de precisión de los datos de base.

6.1.2 Velocidad radial media

La velocidad radial media también se conoce como velocidad Doppler media y representa la media ponderada de la reflectividad de la velocidad de los blancos en una determinada muestra de volumen. La velocidad radial media se refiere al primer momento de la densidad espectral; velocidad radial a los datos de base. Normalmente se determina a partir de un gran número de impulsos sucesivos y se calcula mediante el argumento de la varianza compleja del retardo sencillo. El argumento de covarianza compleja proporciona una estimación del desplazamiento angular del vector de señal Doppler entre impulsos del radar. La velocidad angular del vector Doppler es igual al desplazamiento dividido por el intervalo de tiempo entre impulsos. El espectro Doppler revela la reflectividad y la distribución de velocidades ponderada del radar dentro del volumen del radar. Una señal de interferencia que aparece como ruido de banda ancha presenta una probabilidad uniforme en el plano

complejo y, en consecuencia, no introduce una rotación sistemática del vector Doppler ni afecta a la estimación. Sin embargo, la aleatoriedad de las señales compuestas más la interferencia aumenta la varianza de la estimación de la señal Doppler.

6.1.3 Anchura del espectro

En el diseño de los radares meteorológicos, la anchura del espectro se calcula a partir de la correlación de retardo sencilla suponiendo una densidad espectral Gaussiana. Se trata de una medida de la dispersión de velocidades dentro del volumen de muestra del radar y es la desviación típica del espectro de velocidad. La anchura espectral depende de los gradientes de reflectividad y velocidad a través del volumen de impulso y de la turbulencia dentro del volumen de impulso [Doviak y Zrnic, 1984]². No se realiza una promediación de las muestras utilizadas en los cálculos de anchura del espectro. Sin embargo hay una acumulación de las partes real e imaginaria de las series de muestras; es decir, las muestras tomadas a lo largo del radial.

6.2 Productos de radares meteorológicos con polarización doble

6.2.1 Reflectividad diferencial

La reflectividad diferencial es un producto asociado con los radares meteorológicos polarimétricos y se trata de la relación entre los retornos de potencia horizontal y vertical reflejados. Entre otras cosas, es un buen indicador de la forma de la gota. A su vez, esta forma es una buena estimación del tamaño medio de la gota.

6.2.2 Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación es un producto del radar meteorológico polarimétrico y se trata de una correlación estadística entre los retornos de potencia horizontal y vertical reflejados. El coeficiente de correlación describe las similitudes en las características de retrodispersión de los ecos con polarización horizontal y vertical. Es un buen indicador de las regiones donde se produce una combinación de tipos de precipitación, tales como lluvia y nieve.

6.2.3 Relación de despolarización lineal

Otro producto de radar polarimétrico es la relación de despolarización lineal, que se trata de la relación de un retorno de potencia vertical procedente de un impulso horizontal o un retorno de potencia horizontal procedente de un impulso vertical. También es un buen indicador de las regiones donde aparecen combinaciones de tipos de precipitación.

² DOVIK, R. J. y ZRNIC. D. S. [1984] *Doppler and Weather Observations*. Academic Press, Inc. San Diego, Estados Unidos de América.

6.2.4 Fase diferencial específica

La fase diferencial específica es también un producto del radar meteorológico polarimétrico. Se trata de una comparación de la diferencia de fase de retorno entre los impulsos horizontal y vertical. Esta diferencia de fase viene causada por la diferencia en el número de ciclos de onda (o longitudes de onda) a lo largo del trayecto de propagación para las ondas polarizadas horizontal y verticalmente. No debe confundirse con el desplazamiento de frecuencia Doppler que viene provocado por el movimiento de las partículas de nube y de la precipitación. A diferencia de la reflectividad diferencial, del coeficiente de correlación y de la relación de despolarización lineal, todos ellos dependientes de la potencia reflejada, la fase diferencial específica es «efecto de propagación». También es una buena estimación de la intensidad de lluvia.

6.3 Productos de datos derivados

Utilizando los productos de datos de base, el procesador elabora productos de datos derivados de nivel más elevado para el usuario del radar. Este texto no abordará estos productos de datos derivados en detalle pues varían de un radar a otro y su número es bastante elevado. Para garantizar la precisión de los productos de datos derivados, deben mantenerse también con precisión los productos de datos de base.

7 Diagramas de antena y dinámica de antena

Los radares meteorológicos normalmente utilizan antenas de reflector parabólico que producen un diagrama de antena de haz estrecho. Los diagramas de antena normalizados de la UIT para antenas parabólicas no son aplicables a antenas utilizadas en los radares de meteorología puesto que el diagrama de haz principal generado a menudo es mucho más amplio que el diagrama de haz estrecho real. La utilización de un diagrama de antena más ancho proporciona generalmente resultados de compartición, lo que supone más problemas de interferencia significativa que un diagrama de antena preciso.

7.1 Movimiento de la antena en la exploración de volumen

La cobertura horizontal y vertical requerida para que una exploración de volumen produzca un corte de elevación se logra girando la antena en el plano horizontal con un ángulo de elevación constante. La elevación de la antena se aumenta un valor previamente fijado tras cada corte de elevación. El corte de elevación más baja oscila normalmente entre 0° y 1° y la elevación más elevada se encuentra en la gama de 20° a 30° , aunque algunas aplicaciones pueden utilizar elevaciones de hasta 60° . La velocidad de rotación de la antena varía dependiendo de las condiciones meteorológicas y de los productos requeridos en ese instante. Tanto la velocidad de rotación como la gama de elevación, etapas de elevación intermedia y frecuencia de repetición de impulsos se ajustan para obtener una calidad óptima. Una velocidad de rotación de antena baja proporciona un tiempo de inactividad largo en cada radial para lograr la máxima sensibilidad.

Una elevada velocidad de rotación de antena permite al operador generar una exploración de volumen en un corto periodo de tiempo cuando conviene cubrir todo el volumen lo más rápidamente posible. La variación de los pasos de elevación y de la velocidad de rotación puede dar lugar a unos tiempos de adquisición de exploración de volumen que van desde un minuto hasta 15 minutos. Los largos periodos de tiempo para una exploración de volumen completa, en comparación con otros radares que giran con una elevación constante, hacen necesario realizar simulaciones dinámicas más largas para obtener muestras de resultados que sean significativamente estadísticos.

7.2 Otras estrategias de movimiento de antena

Los radares meteorológicos también utilizan otras estrategias de movimiento de antena para aplicaciones especiales e investigación. Las exploraciones de sector se emplean para obtener parte de un corte de elevación. Las exploraciones de volumen de sector realizan una exploración de volumen para una fracción de los 360° de acimut cuando la antena toma múltiples cortes de elevación. El tercer modo mantiene la antena a un acimut y elevación constantes para supervisar un punto específico en la atmósfera. Estas tres estrategias permiten al operador del radar concentrarse en una parte específica de la atmósfera.

7.3 Diagramas de antena

Siempre que sea posible, deben llevarse a cabo estudios de comparación utilizando el diagrama de antena real del radar sometido a estudio, pero en los casos en que no se dispone de datos sobre dicho diagrama, sería conveniente contar con un conjunto genérico de curvas o fórmulas para obtener las características representativas de la antena.

Actualmente se utilizan tres modelos matemáticos para diagramas de antena de radar en los análisis de interferencia con los radares indicados en las Recomendaciones UIT-R F.1245, UIT-R M.1652 y UIT-R F.699. Aunque son representativas de antenas parabólicas, estas Recomendaciones suelen sobrestimar la anchura de haz de un diagrama de antena de haz estrecho, similar a los que se utilizan normalmente en los radares meteorológicos.

Actualmente no hay ninguna ecuación del diagrama de radiación de antena de radar definida en el UIT-R para representar dichas antenas de haz estrecho. Si es necesario, podrían utilizarse modelos de diagrama de radiación de antena generalizados, como los indicados en el Cuadro 2 y en ausencia de datos medidos, para realizar análisis de interferencia en que intervenga una sola fuente de interferencia o múltiples fuentes de interferencia; véase asimismo la Recomendación UIT-R M.1851. θ_3 es el ancho de haz de potencia media (grados).

CUADRO 2
Elección de diagramas

Gama del nivel del primer lóbulo lateral por debajo del nivel de cresta (dB)	Elección del posible tipo de distribución de antena	Diagrama de directividad $F(\mu)$	Ecuación de la máscara más allá del punto crítico del diagrama donde la máscara se desvía del diagrama teórico (dB)	Punto crítico del diagrama de cresta donde la máscara se desvía del diagrama teórico (dB)	Punto crítico del diagrama medio donde la máscara se desvía del diagrama teórico (dB)	Constante añadida al diagrama de cresta para convertirlo en máscara media (dB)	Nivel mínimo de máscara propuesto (dB)
-13,2 a -19 dB	Uniforme	$\frac{\text{sen}(\mu)}{\mu}; \mu = (\pi \cdot 50,8 \cdot \text{sen}(\theta))/\theta_3$	$-8,584 \cdot \ln \left(2,876 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-5,75	-12,16	-3,72	-40
-20 a -30 dB	COS	$\frac{\pi}{2} \left[\frac{\cos(\mu)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]; \mu = (\pi \cdot 68,8 \cdot \text{sen}(\theta))/\theta_3$	$-17,51 \cdot \ln \left(2,33 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-14,4	-20,6	-4,32	-50
-31 a -38 dB	COS^2	$\frac{\pi^2}{2 \cdot \mu} \left[\frac{\text{sen}(\mu)}{\pi^2 - \mu^2} \right]; \mu = (\pi \cdot 83,2 \cdot \text{sen}(\theta))/\theta_3$	$-26,882 \cdot \ln \left(1,962 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-22,3	-29,0	-4,6	-60
-39 dB o más	COS^3	$\frac{3 \cdot \pi \cdot \cos(\mu)}{8} \left[\frac{1}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} - \frac{1}{\left(\frac{3 \cdot \pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]; \mu = (\pi \cdot 95 \cdot \text{sen}(\theta))/\theta_3$	$-35,84 \cdot \ln \left(1,756 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-31,5	-37,6	-4,2	-70

8 Efectos de la interferencia y del ruido solar sobre los radares meteorológicos

La determinación de los efectos de la interferencia sobre los radares utilizados para detectar blancos puntuales es bastante directa. Pueden realizarse pruebas introduciendo blancos conocidos simulados en el radar y determinar visualmente el nivel de interferencia en el cual los blancos se pierden o se generan blancos falsos. La inspección visual de los productos de datos derivados obtenida de una exploración de volumen de un radar meteorológico, como aparece en la consola del operador, no proporciona indicación evidente sobre si la interferencia ha degradado el comportamiento del radar. Por ejemplo, si la interferencia causase una desviación de 1 dB en los datos de reflectividad de base, ello no será evidente en una presentación gráfica de la intensidad de lluvia. Sin embargo, si la interferencia está presente en una gran parte de la exploración del volumen, cada uno de los intervalos resultará afectado en el volumen correspondiente. El efecto acumulativo se traduce en una sobrestimación significativa de la intensidad de lluvia en una región geográfica.

Todos los radares meteorológicos experimentan destellos solares durante los periodos de la salida y la puesta del sol. Aparece un destello solar siempre que el haz principal de la antena se alinea con el sol durante una exploración de volumen. El efecto de los destellos solares, en el caso particular de los radares meteorológicos, produce una pérdida total de datos a lo largo de uno o dos radiales en dirección al sol. Cabe señalar que la predictibilidad de los destellos solares permite calibrar en acimut la dirección de puntería de los radares.

Los efectos del sol son perjudiciales, pero predecibles. Con otras formas de interferencia y ruido el emplazamiento y la intensidad son desconocidos y no pueden predecirse o solventarse fácilmente mediante procesamiento o mediante la interpretación del operador.

Los productos de base son afectados por la interferencia de dos formas distintas. En primer lugar, los valores pueden desviarse, lo que disminuye la precisión del sistema, y en segundo lugar, la varianza de los resultados puede resultar modificada. En presencia de interferencia, la reflectividad es sensible a la desviación, la velocidad radial media es sensible a los errores de varianza y la anchura del espectro viene afectada tanto por la desviación como por los errores de varianza. Para la anchura del espectro, los errores debidos a las desviaciones son más significativos que los debidos a la varianza porque la desviación, o desplazamiento, representa un error en la medición de la velocidad, mientras que la varianza supone simplemente una incertidumbre en las velocidades medidas.

8.1 Repercusión de la interferencia sobre los modos de funcionamiento

En modo de cielo despejado, la relación señal/ruido de los retornos es la más baja y los datos son más vulnerables a su degradación debido a la interferencia. Normalmente, con funcionamiento en cielo despejado, el meteorólogo busca los signos iniciales de convección puesto que ello puede desembocar en condiciones climatológicas extremas y posiblemente en tornados. La detección del fenómeno de convección exige detectar líneas finas causadas por los dispersores que indican fronteras de discontinuidad que dan lugar a la convección. La anchura de estas áreas de convección a menudo es del orden de uno o dos radiales en anchura y la interferencia a lo largo de estos radiales impediría su detección. Por lo tanto, la interferencia, incluso durante periodos de tiempo muy breves, podría dar lugar a pérdidas de detección de fenómenos meteorológicos extremos. Si esta información se pierde a lo largo de un radial crítico durante una exploración de volumen, la detección se retrasará del orden de 10 minutos hasta que la exploración del volumen devuelva la posición de la antena a esa zona de la atmósfera.

El modo de precipitación es el más exigente en términos de comunicaciones, generación de productos de radar y procesamiento y presentación al usuario. En este modo, casi todos los algoritmos se basan en los datos de base de reflectividad, velocidad media y anchura del espectro para generar los productos derivados utilizados por el operador.

8.2 Repercusión de la interferencia sobre los productos de base

Los productos de base son afectados por la interferencia de dos formas distintas. En primer lugar los valores pueden desviarse, lo cual disminuye la precisión del sistema y, en segundo lugar, la variación de los resultados puede resultar modificada. En presencia de interferencia, la reflectividad es sensible a las desviaciones, la velocidad radial media es sensible a los errores de varianza y la anchura del espectro viene afectada tanto por las desviaciones como por los errores de varianza. Para la anchura del espectro, los errores debidos a las desviaciones son más significativos que los debidos a la varianza porque las desviaciones, o desplazamientos, representan un error en la medición de la velocidad, mientras que la varianza representa simplemente una incertidumbre en las velocidades medidas.

La reflectividad se calcula a partir de una media lineal de la potencia. En algunos radares meteorológicos se efectúan estimaciones de reflectividad para intervalos que abarcan 250 m de profundidad y la anchura de un radial (aproximadamente $1,0^\circ$ en acimut). Estos sistemas realizan una media de los intervalos para producir una estimación de la reflectividad a intervalos específicos. Este promedio de cuatro a uno puede reducir aún más los efectos de la interferencia que se producen en un solo impulso. La próxima generación de sistemas de radares meteorológicos tiene previsto añadir un producto de reflectividad con «súper-resolución», que eliminará las estimaciones de reflectividad media producidas a intervalos de 250 m. Adicionalmente, el radial se reducirá a la mitad ($0,5^\circ$), y utilizará únicamente la mitad de las muestras. El resultado total será la disminución del tamaño de la muestra por un factor de ocho. Por consiguiente, la interferencia puede ser más pronunciada en el producto de reflectividad con «súper-resolución» que en las estimaciones actuales.

Para los momentos Doppler los efectos de la interferencia son no lineales. La velocidad se calcula a partir del argumento complejo de la covarianza y la anchura del espectro a partir de la autocorrelación. Una combinación de señal e interferencia no representa una escala lineal como sucede con la media para la reflectividad. Estas estimaciones se derivan de la acumulación de mediciones de señal consistentes en obtención de información tanto de magnitud como del ángulo de fase. Las fuentes de interferencia probablemente presentarán fases aleatorias con respecto a la señal coherente del radar de meteorología y su contribución a la precisión de la estimación es difícil de predecir.

En términos de anchura del espectro, la interferencia introduce una desviación y un aumento en la varianza de las estimaciones de anchura del espectro. La desviación en la estimación es más perjudicial que el incremento en la varianza.

Deben especificarse los errores de medición de manera que las observaciones del radar puedan asimilarse adecuadamente a fin de realizar una previsión meteorológica numérica. Existen dos aspectos relacionados con este problema:

- 1) errores en las mediciones originales dentro de cada volumen de impulso del radar que vienen causadas en parte por las señales interferentes; y
- 2) representación de las estimaciones de datos del radar utilizadas en el proceso de asimilación.

Para velocidades radiales, la primera fuente de error depende de la intensidad de la señal de retorno y la dispersión o anchura del espectro de velocidad Doppler. A su vez, la anchura espectral depende fundamentalmente de los gradientes de reflectividad y velocidad en el interior y a través del volumen del impulso y de la turbulencia dentro de dicho volumen [Doviak y Zrnic, 1984]. Las estimaciones de estos errores son complicadas por el hecho de que los propios componentes necesarios para efectuar una estimación fiable del error simplemente se miden y, por consiguiente, presentan incertidumbres inherentes.

Se ha planteado el concepto de que para una determinada célula de resolución de alcance, los radares meteorológicos realizan una media de los retornos de múltiples impulsos durante el tiempo de inactividad de un radial. Se ha sugerido que en el caso en el que una interferencia se produce durante un breve intervalo del tiempo de inactividad del radial, el efecto de la misma será promediado con los retornos de los impulsos sin interferencia, reduciendo de esa forma los efectos de la misma. Por ejemplo, si el radar funciona con una relación de interferencia/ruido muy inferior a -10 dB, pero este valor de -10 dB se supera durante un breve periodo de tiempo (pequeño porcentaje del tiempo de inactividad del radial), el efecto de la interferencia se promediará con los retornos sin interferencia. Si se viola el valor I/N de -10 dB, pero no por un elevado nivel de interferencia, el resultado posible es que la desviación de la reflectividad de los retornos promediados puede permanecer dentro del objetivo de diseño de un radar determinado. Desafortunadamente, este método sólo puede ser eficaz si la señal o señales interferentes son coherentes a lo largo del tiempo de inactividad. Como esto no sucede muy a menudo, puede que las técnicas de promediación no sean las más eficaces para reducir los efectos de interferencia en los momentos Doppler. Sin embargo, con la excepción de los radares meteorológicos que utilizan procesamiento espectral, la promediación puede ser un método muy eficaz de disminuir la interferencia dado que la interferencia media a lo largo del tiempo de inactividad presenta un valor de I/N inferior a -10 dB.

Como se ha explicado en el § 4.2, una relación $I/N = -6$ dB da lugar a una reducción en la capacidad de alcance de aproximadamente el 12% para los radares meteorológicos y el 6% para otros radares. Por otro lado, dicha reducción de la capacidad de alcance del 6% (que también está relacionada con una degradación del 11% de la cobertura de zona) estaría relacionada con un incremento del ruido de unos 0,5 dB en los radares meteorológicos, lo que corresponde a un valor $I/N = -10$ dB. Recientemente se han llevado a cabo pruebas para apoyar dicho valor de I/N de -10 dB en caso de interferencia constante (véase el Anexo 2 al Informe UIT-R M.2136).

La influencia de la interferencia en los productos de los radares meteorológicos polarimétricos o de polarización doble, tales como la reflectividad diferencial, el coeficiente de correlación, la relación de despolarización lineal y la fase diferencial específica, necesita estudios adicionales desde una perspectiva matemática y basada en mediciones a fin de cuantificar los niveles de criterios de protección necesarios para garantizar que los productos del radar polarimétrico no se ven comprometidos por la interferencia.

Puede concluirse que la interferencia causada a los radares meteorológicos debe minimizarse con el objetivo de reducir o evitar todo tipo de interferencias. A diferencia de los sistemas de comunicación que utilizan redundancia y corrección de errores, los radares meteorológicos no pueden recuperar la información perdida. Sin embargo, al considerar la utilización de las características del radar para los estudios de compartición realizados por el UIT-R, deben tenerse en cuenta otros factores que se abordan en los siguientes puntos.

8.3 Obtención matemática de los criterios de protección de los radares meteorológicos

Los radares meteorológicos llevan a cabo tres mediciones básicas que, junto con la información del operador, se utilizan para obtener los productos meteorológicos. Los tres productos de base a partir de los cuales se obtienen otros productos son la reflectividad del volumen, la velocidad radial y la anchura del espectro.

En el § 2 del Anexo 1 al Informe UIT-R M.2136 figura una detallada discusión de los criterios de interferencia del radar meteorológico obtenidos matemáticamente para estos tres productos, apoyados por resultados de pruebas que validan estas conclusiones.

Si bien es conveniente, y a menudo se hace, no puede aplicarse con precisión un solo valor de criterio de protección a todos los radares meteorológicos que funcionan en una sola banda. Estos radares están diseñados con distintos objetivos de funcionamiento y optimizados para unas condiciones meteorológicas específicas. La precisión de los productos de base y la mínima relación señal/ruido del radar, S/N , varían según las aplicaciones del mismo. Cuanto menor sea el valor de la mínima S/N utilizada por el radar menor será el criterio de protección requerido.

El procesamiento de la señal elimina muchos de los efectos del ruido del sistema del radar de las mediciones de reflectividad y anchura del espectro. Como resultado, algunos sistemas pueden ofrecer estimaciones de estos productos para niveles de señal por debajo del nivel de ruido de los receptores. El operador del radar selecciona el umbral señal/ruido³, SNR, que en algunos sistemas oscila entre -12 dB y 6 dB.

El radar meteorológico típico utilizado en los ejemplos que aparecen en el § 2 del Anexo 1 al Informe UIT-R M.2136 proporciona mediciones útiles hasta valores SNR de -3 dB. La interferencia a este nivel de señal y por encima degradará la calidad de los productos de base, lo que pone en evidencia la necesidad de establecer una relación I/N que proteja la integridad de estos productos.

Conociendo las especificaciones técnicas y los requisitos de precisión de los datos de base de un radar meteorológico determinado pueden obtenerse los valores teóricos de I/N necesarios para garantizar que los productos de base no quedan comprometidos en cuanto a desvíos y varianza.

8.4 Tipos de posible interferencia

La interferencia experimentada por los radares meteorológicos puede ser de distintos tipos:

- constante;
- variable en el tiempo;
- impulsiva.

Como primer paso, se propone determinar la influencia de una interferencia constante correspondiente a un criterio de protección de $I/N = -10$ dB, y a continuación evaluar el posible criterio de protección para las otras fuentes de interferencia con objeto de asegurar un nivel similar de degradación en el comportamiento del radar.

8.4.1 Repercusión de una interferencia constante

Un criterio de protección de $I/N = -10$ dB corresponde a un incremento de ruido o energía de $0,5$ dB.

Partiendo del principio de que los radares se calibran a fin de que coincidan con el nivel del ruido del receptor (es decir, unos -113 dBm) para un nivel de reflectividad 0 dBz a 100 km, un incremento del ruido cambia las condiciones nominales del radar, disminuyendo su alcance.

Basándose en ello, y suponiendo una cobertura actual de los radares meteorológicos típicos que funcionan en la gama de frecuencias $5\ 250$ - $5\ 725$ MHz que se extiende aproximadamente hasta 200 km, el Cuadro 3 resume las pérdidas en alcance y cobertura en función del valor I/N y del incremento del ruido.

³ El umbral SNR es el nivel más bajo para el cual se procesa la señal de retorno.

CUADRO 3

Pérdidas en alcance y cobertura

Incremento del ruido (dB)	I/N correspondiente (dB)	Pérdidas de cobertura (km)	Pérdidas de cobertura (% con respecto a la superficie total)
0,5	-10	11	11%
1	-6	22	21%
2	-2,3	42	38%
3	0	59	50%
4	1,8	75	61%
5	3,3	88	69%
6	4,7	100	75%
7	6	111	80%
8	7,3	121	84%
9	8,4	130	88%
10	9,5	137	90%

Por otro lado, una interferencia constante también provoca un incremento de la energía recibida por el radar que se considerará en el cálculo de la reflectividad.

Siguiendo la descripción realizada en § 2.2, la tasa de precipitación correspondiente a un cierto nivel de reflectividad (dB) viene dada por:

$$z = AR^B$$

siendo:

- z: reflectividad
- A: constante de dispersión
- B: factor multiplicador

y

$$z = 10 \log z \text{ (dBz)}$$

siendo:

dBz: reflectividad (dB).

Reordenando los términos y resolviendo para R se obtiene la siguiente ecuación:

$$R_{(\text{mm/h})} = \left(\frac{10^{\left(\frac{\text{dBz}}{10} \right)}}{200} \right)^{\left(\frac{1}{1,6} \right)}$$

Suponiendo un incremento de energía constante, C , la intensidad de lluvia resultante es:

$$R_{(\text{mm/h})} = \left(\frac{10^{\left(\frac{\text{dBz} + C}{10}\right)} \left(\frac{1}{1,6}\right)}{200} \right)$$

El incremento de intensidad de lluvia en porcentaje es, por lo tanto, una constante que viene dada por:

$$p(R_{(\text{mm/h})}) = 100 \times \left(10^{\left(\frac{C}{16}\right)} - 1 \right)$$

En el Cuadro 4 aparecen las constantes de dispersión típica y los factores multiplicadores para diversos tipos de precipitación⁴.

CUADRO 4
Constantes de dispersión y factores multiplicadores para distintos eventos de precipitación

Variables	Lluvia estratiforme	Lluvia de convección	Nieve	Granizo
Constante de dispersión (A)	200	500	2 000	2 000
Factor multiplicador (B)	1,6	1,5	2	1,29

El Cuadro 5 resume el porcentaje de incremento de lluvia para varios eventos de precipitación.

⁴ Las constantes de dispersión y los factores multiplicadores para la lluvia estratiforme, la lluvia de convección, la nieve y el granizo, se han obtenido a partir de mediciones.

CUADRO 5

Resumen de sobrestimación de la precipitación

Incremento de ruido (dB)	I/N correspondiente (dB)	Incremento de intensidad de lluvia estratiforme (%)	Incremento de intensidad de lluvia por convección (%)	Incremento de intensidad de nieve (%)	Incremento de intensidad de granizo (%)
0,5	-10	7,5	8,0	5,9	9,3
1	-6	15,5	16,6	12,2	19,5
2	-2,3	33,4	35,9	25,9	42,9
3	0	54,0	58,5	41,3	70,8
4	1,8	77,8	84,8	58,5	104,2
5	3,3	105,4	115,4	77,8	144,1
6	4,7	137,1	151,2	99,5	191,8
7	6	173,8	192,9	123,9	248,8
8	7,3	216,2	241,5	151,2	317
9	8,4	265,2	298,1	181,8	398,5
10	9,5	321,7	364,2	216,2	495,9

Estos cálculos demuestran que, independientemente del valor de la intensidad de lluvia y del tipo de precipitación, el porcentaje de sobrestimación correspondiente a un incremento de energía constante determinado también es constante y, por consiguiente, no puede despreciarse.

Además, considerando el cálculo de reflectividad para un determinado píxel basado en la media (dBz), sobre todas las estimaciones y la desviación típica correspondiente, conviene señalar que un incremento de energía constante de todas las estimaciones aumentará la media pero no modificará la desviación típica, lo que significa que no modificará la detección de lluvia por parte del radar (es decir, una medición que no se considera como una célula de lluvia seguirá sin considerarse como tal), pero tendrá únicamente repercusiones en la intensidad de lluvia.

También es interesante indicar que para la sobrestimación de pérdida de cobertura o de intensidad de lluvia, un criterio de protección de -10 dB representa una degradación en el comportamiento del radar comprendida entre el 7 y el 11%, que son cifras generalmente acordadas para todos los servicios de radiocomunicaciones.

En el caso de mediciones Doppler, la evaluación de la repercusión de una interferencia constante determinada es algo distinta y depende en particular de la forma en que la fase de la señal interferente puede modificar la fase de la señal deseada.

Esta última hipótesis evidentemente no es fácil de hacer y dependerá de la señal y/o del medio ambiente. Ambas situaciones se consideran en los siguientes casos:

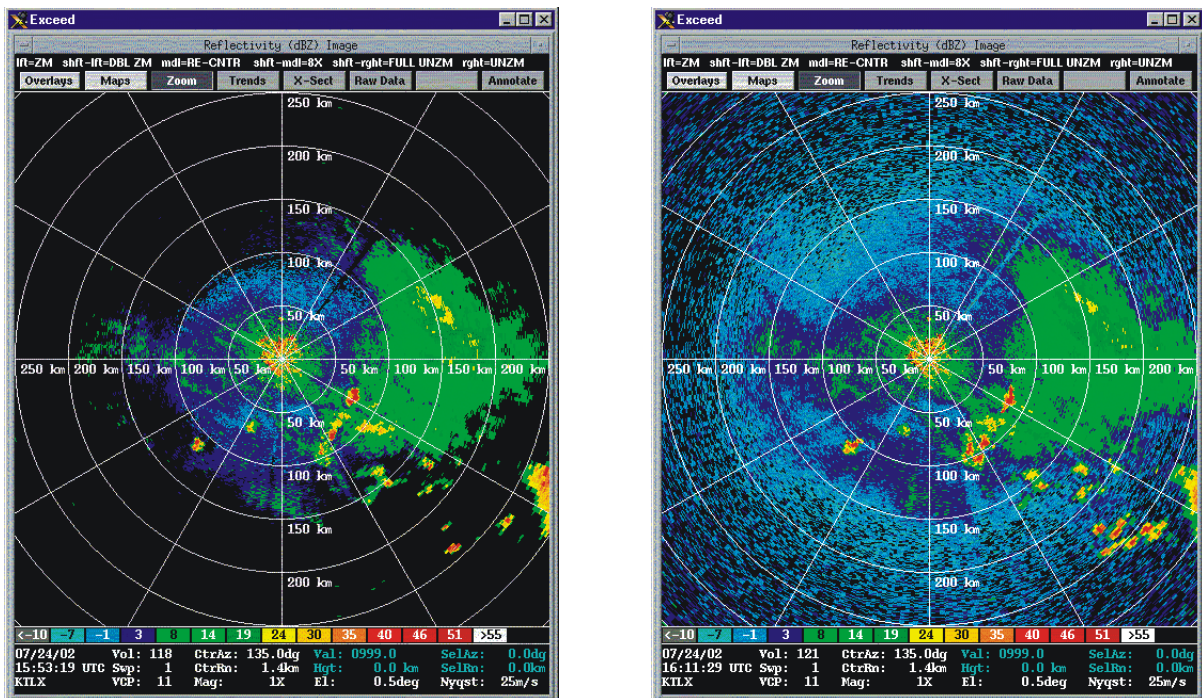
- *Caso 1:* Si la fase de la señal interferente detectada por el radar es aleatoria, ello significa que el vector resultante será estadísticamente nulo cualquiera que sea su nivel. Por consiguiente, teóricamente no tendrá ninguna repercusión en las mediciones del viento.
- *Caso 2:* Si la fase detectada no es aleatoria y es casi constante, dará lugar a un vector constante con un cierto módulo y las repercusiones sobre las mediciones del viento dependerán tanto de la fase como del módulo de dicho vector.

Además, también puede suponerse que cuando el nivel de interferencia es muy inferior a la señal deseada, la fase de esta señal deseada no se modifica. Si la señal interferente es muy superior, la fase detectada por el radar será la fase de la señal interferente y seguirá siendo válido el razonamiento de los Casos 1 y 2 anteriores. Entre estas dos situaciones, es decir cuando los niveles de las señales interferente y deseada son similares, resulta bastante difícil evaluar cuál de ambas señales controlará la detección de fase.

8.4.2 Repercusiones de la interferencia impulsiva

La interferencia impulsiva puede tener una influencia muy significativa sobre los datos de reflectividad que los meteorólogos utilizan para prever eventos climatológicos importantes. En algunos casos, la interferencia impulsiva daría lugar a datos de retorno que no pueden producir con fiabilidad una imagen de blancos en la atmósfera. En la Fig. 12 aparecen ejemplos de esta situación.

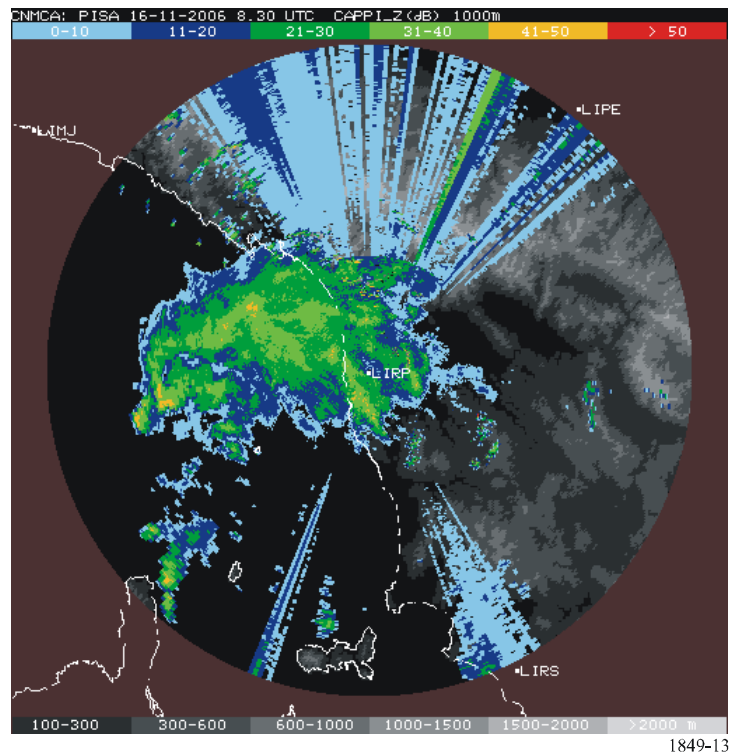
FIGURA 12
 Imágenes de radar meteorológico de señales sin interferencia
 y señales degradadas por la interferencia
 (modo precipitación)



1849-12

En la Fig. 13 aparece un ejemplo adicional de interferencia en un radar meteorológico provocada por un solo transmisor de baja potencia en interiores.

FIGURA 13
Interferencia en un radar meteorológico
(modo precipitación)



En el caso de una aplicación interferente que transmite señales impulsivas, y debido al principio de las mediciones de lluvia y viento que se basan en calcular la media de numerosos impulsos de radar, parece probable que la PRF de las ventanas de los radares meteorológicos (anchura de impulso) y la fuente de interferencia serán quienes determinen la repercusión sobre los radares meteorológicos.

En una primera aproximación, se supone que este valor puede calcularse a partir de la fórmula que aparece en el § 3.2 de la Recomendación UIT-R RS.1280, que proporciona la fracción de impulsos que coinciden entre dos aplicaciones de impulsos que 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:

$$f_c = \frac{GCF(PR F_i, PR F_g)}{PR F_g} \quad \text{para el Caso I}$$

$$f_c = PR F_i(\tau_g + \tau_i) \quad \text{para el Caso II}$$

donde:

$PR F_i$: frecuencia de repetición del impulso interferente; unidades Hz o impulsos por segundo (pps)

$PR F_g$: frecuencia de repetición de la ventana

$GCF(PR F_i, PR F_g)$: mayor factor común de $PR F_i$ y $PR F_g$

τ_i : anchura del impulso interferente; unidades segundo

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.

Basándose en ello, para mantener el mismo nivel de degradación (aproximadamente el 10%) que para una interferencia constante donde se aplica un valor $I/N_{constante} = -10$ dB, se supone que la máxima I/N relativa a una interferencia impulsiva viene dada por la expresión:

$$I/N_{impulso} = I/N_{constante} - 10 \log(f_c)$$

De hecho, si la fracción de impulsos coincidentes es 0,5, lo que significa que las estimaciones de uno de los dos radares estará contaminada por la interferencia y que la señal interferente se duplica (+3 dB) comparada con la situación relativa a una $I/N = -10$ dB, es evidente que la media calculada por el radar será la misma.

Por otro lado, la desviación típica aumentará lo cual, en algunos casos, provocará que un evento no relacionado con la meteorología se considere como situación de lluvia. En este caso, se supone que sería aceptable una degradación del 10% pero esto debe validarse y justificarse mediante cálculo así como realizando pruebas.

Debe señalarse que el anterior principio de que los valores más elevados de I/N correspondientes a la potencia de cresta de la interferencia impulsiva pueden ser aceptados por los radares meteorológicos ha sido confirmado mediante pruebas llevadas a cabo recientemente (véase el Anexo 2 al Informe UIT-R M.2136). Aun cuando la anterior fórmula no ha sido plenamente validada para todos los casos, se supone que representa un método pertinente. No obstante sería conveniente realizar más análisis para determinar la relación entre las características de la señal víctima e interferente (PRF y anchura del impulso).

8.4.2.1 Método alternativo para obtener los niveles de I/N de la interferencia impulsiva

Los radares meteorológicos procesan los retornos de señal para medir los patrones de precipitación y viento. El procesamiento supone la recopilación y el tratamiento de los productos de base: reflectividad, velocidad radial media y anchura del espectro. En términos más sencillos, el radar promedia una muestra de los retornos de señal para obtener las estimaciones necesarias con objeto de elaborar los productos meteorológicos. La función de promediación proporcionará al radar meteorológico la capacidad de procesar niveles de interferencia impulsiva más elevados con respecto a la onda continua o a señales de interferencia similares al ruido.

Los radares meteorológicos procesan múltiples retornos del impulso que caen dentro de un intervalo para formar una muestra de un tamaño definido por el usuario. Los múltiples retornos del impulso que constituyen una muestra del intervalo se promedian para obtener la estimación del intervalo. Los sistemas del SETS propuesto y los radares meteorológicos funcionan con frecuencias de repetición de impulsos muy diferentes, de manera que la probabilidad de que más de un impulso interferente caiga en el interior de un conjunto de muestras de intervalo de un solo radar meteorológico es pequeña, teniendo en cuenta el reducido tamaño de la muestra. El método consiste en determinar el máximo nivel de un solo impulso que no contamine la media del tamaño de la muestra más allá de los objetivos de calidad de funcionamiento del producto de los datos de base del radar.

La determinación de un criterio de protección exige conocer el nivel de ruido del receptor del radar, la mínima relación señal/ruido utilizada para el procesamiento y los productos de base del radar (reflectividad, velocidad radial media y anchura del espectro). Como existe una cierta variedad de radares meteorológicos funcionando en la banda de frecuencias, deben hacerse algunas hipótesis. El radar utilizado en el análisis tiene un ruido de fondo del receptor de -110 dBm en la anchura de banda de FI más estrecha.

La mínima relación señal/ruido probablemente es el valor más difícil de determinar sin referencia a radares específicos. Para radares que funcionan en la banda de frecuencias 2 700-2 900 MHz son típicos unos valores de relación señal/ruido de 0 a 3 dB, ya que los radares a las frecuencias más bajas funcionan normalmente para la detección en distancias largas. Los radares meteorológicos que funcionan en la banda de frecuencias 9 300-9 500 MHz se utilizan normalmente para una detección de menor alcance y mayor resolución y pueden funcionar con mayores valores mínimos de la relación señal/ruido. Para este análisis, una S/N de +3 dB y un ruido de fondo de -110 dBm dan lugar a los valores de los requisitos de precisión del producto de los datos de base que aparecen en el Cuadro 6.

CUADRO 6

Requisitos de precisión de los datos

Requisitos de precisión de los datos de base	
Estimación de la reflectividad	1 dB
Estimación de velocidad	1 m/s
Estimación de la anchura del espectro	1 000 Hz

Como muestra el Cuadro 6, el máximo límite de desviación de la reflectividad para el radar meteorológico utilizado en este ejemplo se supone que es 1 dB, lo que se traduce en una relación entre la interferencia y la mínima señal, I/S , de 0,26 o una relación de potencia de 1,26. Se supondrá un tamaño de muestra de la reflectividad de 25. Un tamaño de muestra mayor de 25 es posible, reduciendo más los efectos de un solo impulso, pero este tamaño también incrementa la probabilidad de que se produzca un segundo impulso interferente en la misma muestra.

8.4.2.2 Cálculo de I/N para una fuente interferente impulsiva (un solo impacto)**8.4.2.2.1 Hipótesis**

- El mínimo nivel de señal recuperado normalmente tiene una relación señal/ruido de 2 dB.
- La desviación depende de la relación entre las potencias medias de la señal y la interferencia. Por lo tanto, depende tanto del nivel de interferencia como del número de «impactos» en el periodograma de estimación.
- El máximo nivel de interferencia para la reflectividad se define mediante la desviación de reflectividad.
- Una desviación de reflectividad (R_b) de 1 dB proporciona una relación de potencia de 1,2589.

$$\text{Relación de potencia} = 10^{(R_b/10)} = 10^{(0,1)} = 1,2589$$

Sustrayendo la relación de potencia sin desviación de la relación de potencia en la cual se produce una desviación de 1 dB se obtiene una relación interferencia/señal de 0,2589.

$$I/S = \left[10^{(R_b/10)} - 10^{(0)} \right] = [1,2589 - 1] = 0,2589$$

El nivel de la potencia de interferencia puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$IL = (N_s) (I/S) = (16) (0,2589) = 4,14$$

Este valor corresponde a una señal de 6,17 dB.

$$I_L \text{ (dB)} = 10 \log (4,14) = 6,17 \text{ dB}$$

Para una relación señal/ruido de 3 dB, I/N se calcula como sigue:

$$I/N = 6,17 \text{ dB} + 3 \text{ dB} = 9,17 \text{ dB}$$

Combinando estos factores en una función que describe I/N en relación con N_s , I/N y R_b se obtiene una ecuación que proporciona el máximo valor de I/N requerido para un solo «impacto»:

$$I/N = [10 \log [(N_s) (I/S)]] + S/N$$

donde:

N_s : número de muestras en la estimación

S_{mp} : potencia media de la señal

S/N : relación señal/ruido en el receptor

I/S : relación interferencia/señal

e I/S se expresa como:

$$I/S = [10(R_b/10)] - [10 \uparrow (N_{nf}/10)]$$

donde:

R_b : desviación de la reflectividad

N_{nf} : nivel de ruido de fondo normalizado.

Combinando las ecuaciones se obtiene:

$$I/N = [10 \log [(N_s) ([10 \uparrow (R_b/10)] - [10 \uparrow (N_{nf}/10)])]] + S/N$$

A continuación figura un ejemplo de cálculo basado en las hipótesis anteriores.

8.4.2.2.2 Ejemplo de cálculo

Hipótesis:

$$N_s = 16$$

$$S/N = 3 \text{ dB}$$

$$R_b = 1 \text{ dB}$$

$$N_{nf} = 0 \text{ dB}^5$$

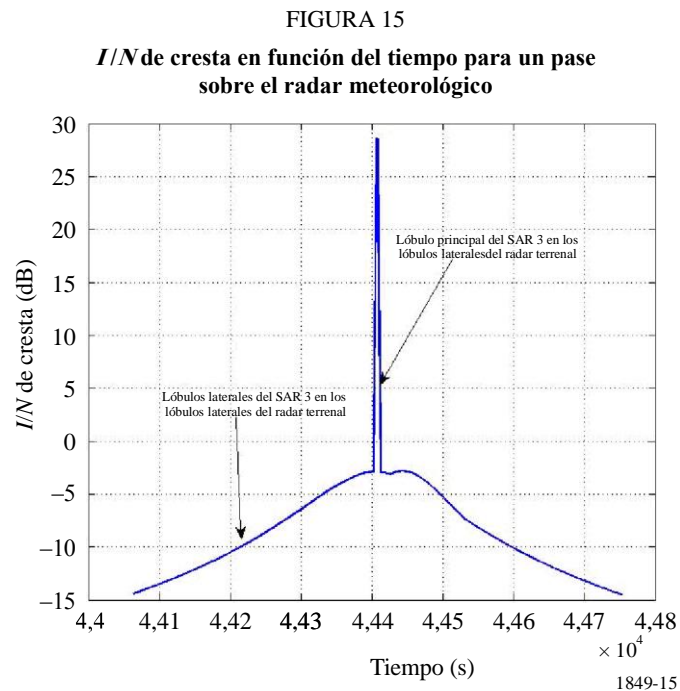
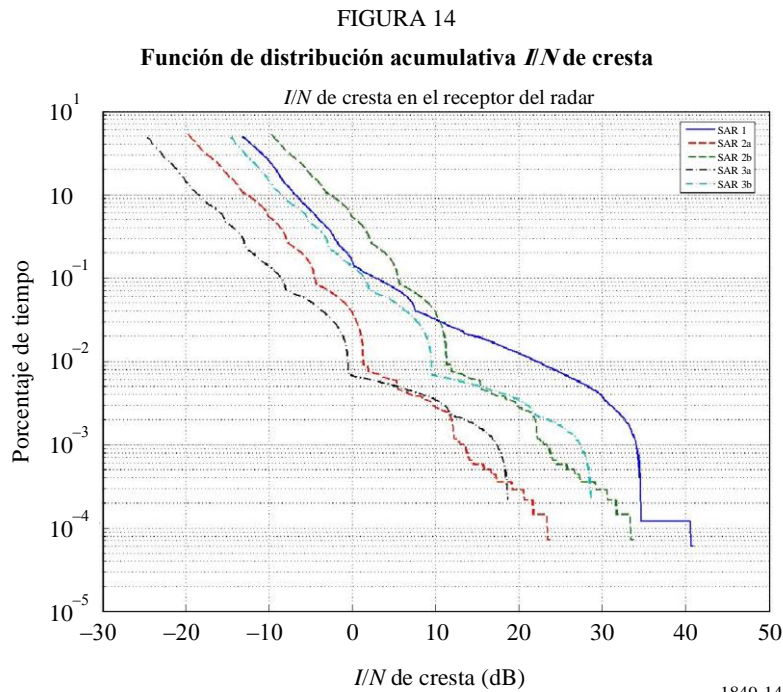
$$I/N = [10 \log [(N_s) ([10 \uparrow (R_b/10)] - [10 \uparrow (N_{nf}/10)])]] + S/N$$

$$I/N = [10 \log [(16) ([10 \uparrow (1/10)] - [10 \uparrow (0/10)])]] + 3 = 9,17 \text{ dB}$$

8.4.3 Repercusiones de una interferencia variable en el tiempo

Las Figs. 14 y 15 describen la posible interferencia causada por un sistema de radar de abertura sintética (SAR) a un radar meteorológico y presenta una interferencia variable en el tiempo.

⁵ En este ejemplo, el nivel de ruido de fondo se ha normalizado al nivel de la señal sin desviación y se ha fijado a 0 dB.



Basándose en estas figuras probablemente se producirán dos situaciones:

- a) en la primera, aparecerá un elevado nivel de I/N durante un breve periodo de tiempo que probablemente dejará al radar fuera de funcionamiento durante este periodo, bloqueando las capacidades de medición de la lluvia o presentando una gran sobrestimación de la intensidad de lluvia;
- b) en la segunda, a lo largo de un amplio periodo de tiempo (aproximadamente 400 s), se rebasarán los criterios de interferencia.

Es difícil evaluar la repercusión de este tipo de interferencia sobre los radares meteorológicos. Sin embargo, debe suponerse que debido a la corta duración de la integración de píxel, una interferencia variable en el tiempo probablemente presentará a corto plazo (es decir, en un análisis píxel a píxel) la

misma repercusión que una interferencia constante (impulsiva o no) como la descrita en los § 8.4.1 y 8.4.2. Determinar la influencia de una interferencia variable en el tiempo caso a caso y píxel a píxel no es una tarea fácil.

Reconociendo la necesidad de realizar análisis más detallados, cabe señalar que un nivel I/N de 30 dB (sin tener en cuenta el aspecto impulsivo de la emisión del SAR) que aparecería en la situación 1 puede producir en una zona determinada una gran sobrestimación de la intensidad de lluvia instantánea, lo que contaminará las estadísticas de lluvia a largo plazo (de 1 hora hasta varios días) que se utilizan en los procesos de alerta hidrológica. Una duración temporal de la interferencia de unos 400 s corresponde aproximadamente a 7 rotaciones del radar y se relaciona con los lóbulos laterales del radar. En este caso, serán impactados un gran número de píxeles (y, por consiguiente, una amplia zona geográfica) a lo largo de varias exploraciones, haciendo imposible la aproximación de los píxeles. El tamaño de la zona geográfica depende evidentemente del nivel de interferencia que se supone impacta por primera vez en el borde de la zona de cobertura del radar. Incluso una ligera interferencia puede presentar una pérdida de cobertura de varias decenas en porcentaje.

Determinar la influencia de la interferencia variable en el tiempo no es tarea fácil y exige un análisis caso a caso que debe tener en cuenta los resultados de simulación dinámica sobre los que se aplicarán los criterios de interferencia utilizados para las fuentes de interferencia constantes o impulsivas.

8.5 Conclusiones sobre los criterios de protección de los radares meteorológicos

Aunque los requisitos de protección para los radares meteorológicos dependen fundamentalmente de sus características y especificaciones, el análisis desarrollado anteriormente en el § 8, y los elementos que figuran en el Informe UIT-R M.2136, consideran las repercusiones tanto en el alcance de los radares como en la precisión de los productos de base y confirman que, para una interferencia constante, corresponde un valor de $I/N = -10$ dB y, en consecuencia, debe utilizarse dicho valor para garantizar la protección de los radares meteorológicos. Este criterio es coherente con las actuales Recomendaciones del UIT-R.

Los análisis y pruebas de interferencia impulsiva han demostrado que, dependiendo de las características del sistema transmisor y víctima (fundamentalmente la PRF y la anchura del impulso), una mayor I/N está relacionada con la potencia de cresta de la interferencia impulsiva. A la espera de nuevos estudios, puede aplicarse uno de los métodos descritos en el § 8.4.2 o en el § 8.4.2.1 para obtener una aproximación adecuada.

Actualmente, no se ha desarrollado aún una fórmula genérica para la interferencia variable en el tiempo. Dependiendo de que la fuente de interferencia sea continua o impulsiva, a corto plazo (impactos en los radiales del radar) o a largo plazo (exploración del volumen total), los análisis deben realizarse caso por caso y partiendo de resultados de simulaciones dinámicas, teniendo en cuenta los criterios antes mencionados para la interferencia constante o similar a impulsos.

9 Repercusiones de las turbinas eólicas

Para efectuar una previsión meteorológica precisa, los radares meteorológicos se diseñan para realizar observaciones en bandas de altitudes relativamente estrechas. Debido a la sensibilidad de los radares, si las turbinas eólicas aparecen en línea de visibilidad directa con una instalación de un radar meteorológico, pueden bloquear la propagación de las señales del radar causando retornos del eco de reflectividad y produciendo ecos de radar inducidos por la turbulencia. Estos mecanismos de interferencia pueden dar lugar a estimaciones del radar falsas relativas a la acumulación de precipitaciones, falsas alarmas de tornados y mesociclos, identificación errónea de las características de las tormentas e identificación incorrecta de las células de las tormentas. Además, los mecanismos de interferencia pueden degradar el funcionamiento del radar e influir negativamente en las previsiones meteorológicas y funciones de aviso.

9.1 Enmascaramiento

Todo accidente o estructura geográfica que se encuentre entre el radar y el blanco provocará un efecto de ensombrecimiento o enmascaramiento. Es posible que, dependiendo de su tamaño, las turbinas eólicas causen efectos de apantallamiento que pueden variar dependiendo de las dimensiones de la turbina, del tipo del radar transmisor y de las características del mismo (altura, ángulo de las aspas, velocidad de rotación y posición relativa del radar con respecto a la turbina).

9.2 Ecos parásitos

Los retornos del radar pueden ser recibidos por cualquier superficie reflectora del radar. En ciertas zonas geográficas, o bajo condiciones meteorológicas particulares, el comportamiento del radar puede resultar negativamente afectado por retornos no deseados que pueden enmascarar los blancos de interés. Tales retornos no deseados se conocen como ecos parásitos del radar. Para las previsiones meteorológicas, las turbinas eólicas situadas en las proximidades de un radar meteorológico pueden dar lugar a problemas operacionales.

Las señales de los ecos parásitos producidos por el terreno presentan una gran reflectividad, un desplazamiento Doppler casi nulo, una pequeña anchura del espectro y están sistemáticamente localizadas. Comparados con los ecos parásitos producidos por el terreno que aparecen normalmente, la interferencia causada por las turbinas eólicas representan un reto mucho más difícil. Las reflexiones directas serán recibidas tanto por la torre (estacionaria) como por las aspas (no estacionarias). Al igual que los ecos parásitos producidos por el terreno, la señal de ecos parásitos producidos por la turbina eólica (WTC) sigue teniendo una reflectividad bastante elevada con una posible modulación debida a la rotación de las aspas, lo que provoca una variación sistemática de la sección transversal del radar.

El desplazamiento Doppler se verá afectado por varios factores, incluida la velocidad de rotación de las aspas y la orientación del rotor con respecto al haz del radar. La velocidad Doppler debe encontrarse en un máximo cuando el rotor está orientado 90° con respecto a la línea de visibilidad del radar y debe ser casi cero cuando el rotor está frente al radar o de espaldas a él. Como el volumen de resolución del radar probablemente englobará toda la estructura de la turbina eólica cabe esperar que la anchura del espectro aumente de manera significativa. Ello se debe a la rotación de las aspas enfrentadas o de espaldas al radar. La existencia de múltiples turbinas dentro de un volumen de resolución tendría como consecuencia exacerbar este efecto.

9.3 Energía de retrodispersión procedente de remolinos turbulentos

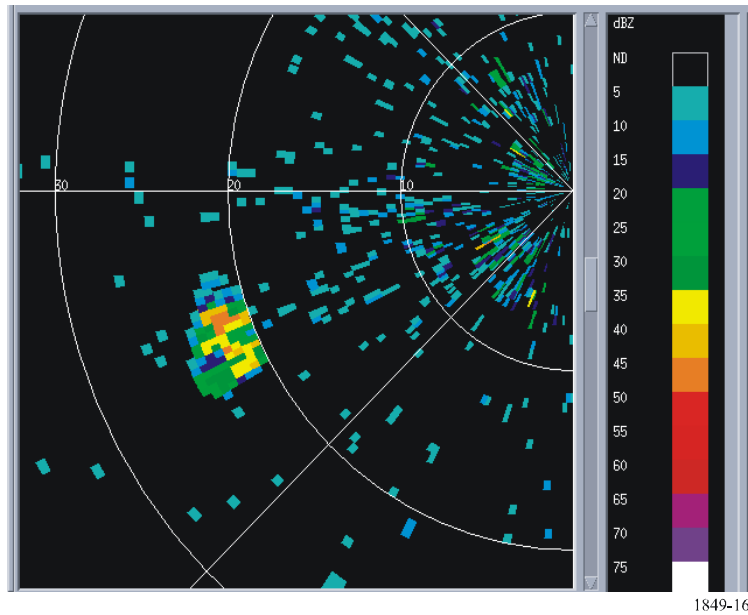
Además de las señales de los ecos parásitos producidos por la turbina eólica a causa de las reflexiones provocadas por las turbinas eólicas reales, puede observarse energía de retrodispersión procedente de remolinos turbulentos producidos por los parques eólicos. Cabe esperar que estos ecos presenten características similares a la retrodispersión en cielo despejado causada por las discontinuidades en el índice de refracción en la escala Bragg del radar. Estos ecos cambiarán de dirección en el parque eólico y probablemente tendrán una reflectividad mucho menor en comparación con las reflexiones directas procedentes de las turbinas. No obstante, pueden aumentar significativamente la zona de cobertura del radar afectada por los ecos parásitos de las turbinas eólicas y, por consiguiente, exacerbar el problema.

9.4 Ejemplos de ecos parásitos causados por turbinas eólicas

En la Fig. 16 se representa la forma en que un parque eólico (conjunto de turbinas eólicas) aparece en la pantalla de presentación de un radar meteorológico. (Se trata de una imagen de reflectividad que muestra los retornos procedentes de un parque eólico situado aproximadamente a 40 km al sudeste del radar meteorológico.)

FIGURA 16

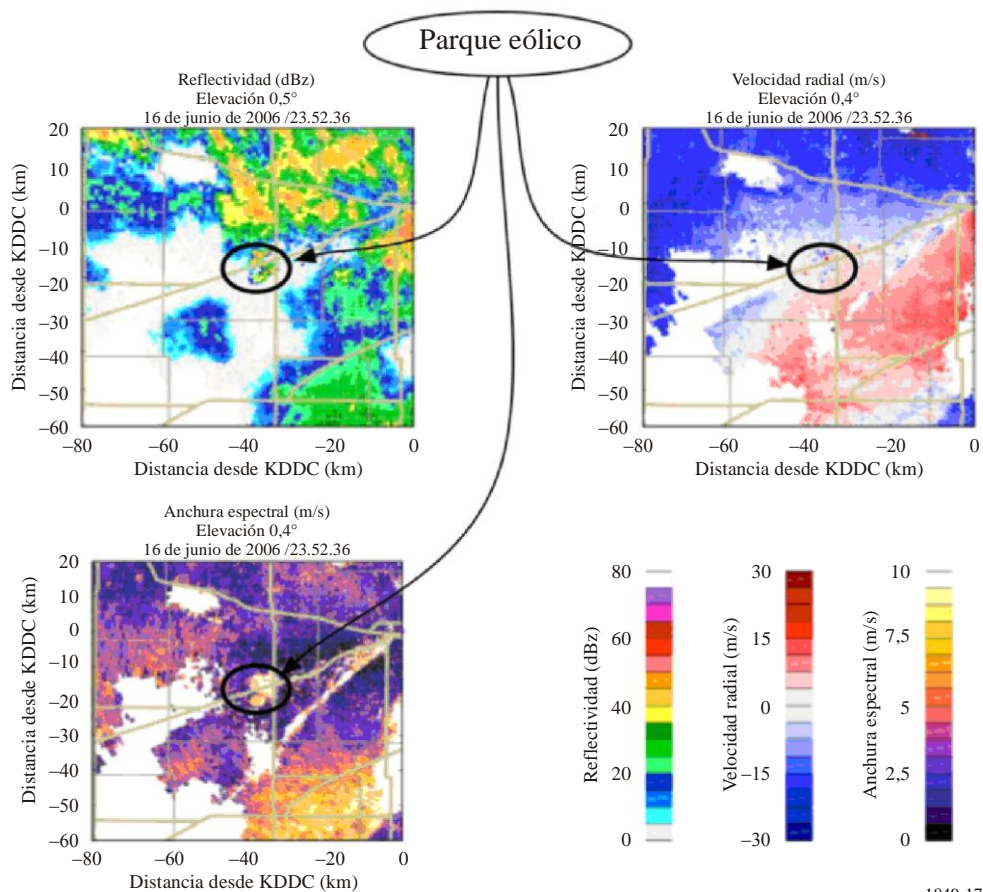
Imagen de un radar meteorológico que muestra un parque eólico situado al sudeste del emplazamiento del radar



La Fig. 17 muestra los datos de Nivel II, donde los ecos procedentes de tormentas aisladas se combinan con los ecos parásitos causados por la turbina eólica. Las señales procedentes de la turbina eólica se caracterizan por una velocidad radial aleatoria y una gran anchura del espectro.

FIGURA 17

Repercusiones de la interferencia producida por un parque eólico sobre los datos de Nivel II



Sin previo conocimiento, sería muy difícil distinguir entre los ecos parásitos producidos por las turbinas eólicas y las tormentas. Como las aspas giran en un sentido o en otro con respecto al radar, cabe esperar una velocidad Doppler con un valor medio casi cero. Unas anchuras del espectro grandes reducirán la precisión de las estimaciones de la velocidad Doppler, como queda ilustrado en la Fig. 17 por pequeñas desviaciones con respecto al cero.

9.5 Repercusiones de los ecos parásitos producidos por turbinas eólicas sobre el funcionamiento de los radares meteorológicos y las precisiones en las previsiones meteorológicas

Se han realizado estudios de funcionamiento real que ilustran la influencia de los WTC sobre los radares meteorológicos. Estos estudios han demostrado que los parques eólicos pueden tener un efecto muy significativo sobre dichos radares y, por tanto, pueden degradar las previsiones de importantes fenómenos meteorológicos.

Los análisis han demostrado claramente que los ecos parásitos producidos por una turbina eólica estarán presentes en una amplia zona acimutal (varias decenas de grados) comparada con la dirección de la turbina eólica, incluso a grandes distancias. Por consiguiente, no puede despreciarse la repercusión de las turbinas eólicas sobre la reflectividad en el funcionamiento de los radares meteorológicos.

Los análisis han puesto en evidencia que la repercusión de una sola turbina eólica sobre el modo Doppler de un radar meteorológico es muy significativa, en particular a distancias inferiores a 10 km en las que todos los datos serán erróneos para cualquier acimut.

Se necesitará algún método para reducir los WTC a fin de proteger los radares meteorológicos contra la interferencia perjudicial procedente de los parques eólicos.

Antes de llegar a conclusiones definitivas sobre los medios de reducir los WTC, deben analizarse estudios adicionales sobre estos ecos parásitos con objeto de entender completamente el grado de influencia de los WTC sobre los radares meteorológicos. Una vez definido este punto, puede ser necesario establecer métodos para reducir los WTC teniendo en cuenta el crecimiento esperado de los sistemas de generación de energía eólica.

A la espera de los resultados de los estudios en curso sobre reducción de la interferencia de los WTC causada a los radares meteorológicos, la solución actual para evitar o limitar las repercusiones de los parques eólicos consiste en garantizar unas ciertas distancias de separación entre los dos sistemas. Por ejemplo, algunos países europeos están considerando actualmente las siguientes recomendaciones:

- a) Ninguna turbina eólica debe instalarse a una distancia de la antena del radar inferior a:
 - 5 km para los radares que funcionan en la gama de frecuencias 5 250-5 725 MHz;
 - 10 km para los radares que funcionan en la banda de frecuencias 2 700-2 900 MHz.
- b) Los proyectos de los parques eólicos deben someterse a un estudio de las repercusiones que causarán en distancias inferiores a:
 - 20 km para radares que funcionan en la gama de frecuencias 5 250-5 725 MHz;
 - 30 km para los radares que funcionan en la banda de frecuencias 2 700-2 900 MHz.

10 Pruebas precedentes de sistemas de radares meteorológicos

Se han realizado pruebas sobre radares meteorológicos con objeto de determinar los criterios de protección del radar. El procedimiento y la metodología de análisis de los datos se han definido detalladamente en el Anexo 1 al Informe UIT-R M.2136. La prueba consistió en introducir una señal interferente en el receptor a un nivel conocido. Se permitió al radar realizar una exploración de

volumen parcial (1 ó 2 rotaciones de antena) o total sin que estuviese presente la interferencia. A continuación el radar se ajustó para que llevase a cabo esa misma exploración de volumen parcial o total una vez introducida la señal interferente en el trayecto de recepción mediante un combinador de RF. Se almacenaron en un disco los datos de productos de base obtenidos de la exploración de volumen sin interferencia y de la exploración de volumen parcial o total con interferencia. Estas exploraciones de volumen alternativas sin interferencia y total o completa con interferencia se llevaron a cabo para unos niveles de señal interferente que proporcionaban unas relaciones interferencia/ruido I/N , entre +6 dB y -15 dB.

A continuación se analizaron los datos realizando una comparación a lo largo de cada radial del intervalo sin interferencia y el intervalo con interferencia. A partir de los datos obtenidos se pudo determinar el nivel de I/N para el cual la interferencia provoca que la precisión de los productos de base se salga fuera de los límites aceptables.

Esta prueba dio orientaciones sobre la manera de mejorar estas pruebas. La prueba, descrita en el Anexo 1 al Informe UIT-R M.2136, se llevó a cabo con los datos recogidos del radar de la atmósfera. Se hizo la hipótesis de que las condiciones de la atmósfera no cambiarían de forma significativa durante los 3 a 5 minutos necesarios para realizar las exploraciones de volumen sin interferencia y con interferencia parcial o total. El análisis de los datos puso en evidencia que esta hipótesis no siempre fue correcta.

Es importante observar que en una amplia gama de radares meteorológicos la sensibilidad a la interferencia puede variar ya que los niveles de interferencia tolerables de cada uno de los radares dependen de la mínima relación señal/ruido de interés, de la desviación estimada y de los requisitos en el comportamiento de la varianza.

Recientemente se han llevado a cabo nuevas pruebas de interferencia para determinar, en un tipo de radar meteorológico que funciona en la gama de frecuencias 5 250-5 725 MHz, la sensibilidad a la interferencia correspondiente a distintas señales de interferencia (constante, onda continua o FM e impulsiva) que confirmaron el análisis descrito en el § 8, así como pruebas precedentes relativas a radares meteorológicos que funcionan en la banda de frecuencias 2 700-2 900 MHz. Un resumen de estos resultados de prueba aparece en el Anexo 2 al Informe UIT-R M.2136.

11 Futuras pruebas

Los futuros métodos de prueba deben examinar la utilización de un sistema de adquisición y regeneración de la señal en los que pueda capturarse, digitalizarse y almacenarse en un disco las señales de FI del radar o las señales I y Q. Las señales de una sola exploración de volumen sin interferencia pueden capturarse y digitalizarse.

Con la utilización de generadores de forma de onda arbitraria y un generador de señal de RF, la señal del radar recibida digitalizada puede reproducirse e introducirse en el receptor del radar todas las veces necesarias para llevar a cabo la prueba, simulando las señales de retorno procedentes de la atmósfera. Este método puede proporcionar condiciones de prueba idénticas para las exploraciones de volumen sin interferencia y las exploraciones de volumen parcial o completas con interferencia.

Para evaluar y confirmar la susceptibilidad de los radares meteorológicos a este tipo de interferencia puede que sea necesario realizar pruebas con interferencia de tipo impulsivo y/o interferencia variable en el tiempo. Esta prueba debe realizarse para radares meteorológicos tanto no polarimétricos (con polarización horizontal) como polarimétricos (con polarización horizontal y vertical).

12 Modelos de propagación

En los puntos precedentes se ha discutido la necesidad de minimizar la cantidad de interferencia admisible recibida por los radares meteorológicos. Sin embargo, también se ha reconocido que deben considerarse los modelos de propagación cuando se realizan estudios de compartición y que los modelos de propagación más avanzados, tales como los que figuran en las Recomendaciones UIT-R P.452 y UIT-R P.526, proporciona los resultados más precisos para estos estudios. Estos modelos de propagación avanzados requieren la utilización de un valor de rebasamiento distinto al 0,0%. Se necesitan nuevos estudios para definir mejor la viabilidad de utilizar estos modelos de propagación avanzados y la forma en que deben aplicarse adecuadamente los resultados en los estudios de compartición.

13 Futuras tendencias

Se está mejorando constantemente el hardware de los sistemas de los radares meteorológicos de varias administraciones. La siguiente mejora será el radar polarimétrico que añade polarización vertical a las actuales ondas del radar que emplean polarización horizontal.

También se están aplicando técnicas adicionales para mejorar el comportamiento de los radares meteorológicos. Entre estas técnicas cabe citar varios algoritmos para resolver las ambigüedades de alcance/velocidad, aumentar la velocidad y adquisición de datos, reducir los efectos de las señales parásitas, disminuir los ecos parásitos y procesar de manera más eficaz las señales a fin de proporcionar estimaciones meteorológicas lo más precisas posibles. Otros trabajos incluyen la utilización combinada de radares meteorológicos y de perfil del viento. También se están estudiando los efectos del rayo y sus peligros para determinar si puede predecirse su inicio y terminación.

Los investigadores empezarán a adaptar en breve la tecnología de radares con sistemas controlados por fase para su utilización en aplicaciones de supervisión del clima. El sistema controlado por fase sustituirá a las antenas parabólicas orientadas de forma mecánica mediante un sistema de antenas orientadas electrónicamente. Este cambio permitirá realizar estrategias de exploración más flexibles y actualizaciones más rápidas de las condiciones meteorológicas cambiantes. Las primeras pruebas sobre sistemas de radares controlados por fase han sido muy prometedoras. La tecnología de sistema controlado por fase aumentará la comprensión básica de la evolución de las tormentas, lo que a su vez facilitará la creación de modelos informáticos mejorados, previsiones más precisas y alertas más tempranas. Además, esta tecnología presenta la posibilidad de incrementar el tiempo de antelación con que puede avisarse de la llegada de un tornado mucho más allá de la actual media de 13 minutos. Estos sistemas controlados por fase no exigen ningún cambio en la potencia de salida del transmisor ni en los requisitos de espectro de los actuales sistemas de antenas. Las mejoras del sistema se implementan de forma más económica mejorando los subsistemas de procesamiento del receptor y la señal. Aunque no se espera que puedan implementarse estos sistemas controlados por fase antes de los próximos diez años, existe la posibilidad de que la versión mejorada de este sistema (si se implementa) no utilice el transmisor existente que se sustituirá por módulos distribuidos de transmisión/recepción en el sistema controlado por fase.

Existe la posibilidad de instalar un CASA (*Center for collaborative adaptive sensing of the atmosphere*, Centro para la teledetección adaptativa conjunta de la atmósfera) basado en los sistemas de radar meteorológico en banda X en la banda de 8 000 MHz a 12 000 MHz del espectro de frecuencias. La Fundación Nacional de Ciencias estableció un nuevo centro de investigación de ingeniería para la detección adaptativa conjunta de la atmósfera (CASA) en septiembre de 2003 a fin de desarrollar adaptadores pequeños y de bajo coste para la teledetección de alta resolución de la atmósfera inferior. Las condiciones meteorológicas en la troposfera inferior están extremadamente submuestreadas lo que impide realizar previsiones y establecer modelos en la región donde se desarrollan las tormentas. Los radares CASA de alta densidad espacial tendrán la posibilidad de

detectar fenómenos meteorológicos evolutivos en la región de la atmósfera inferior que se encuentran a menudo por debajo de la actual cobertura del radar Doppler operacional (es decir, los primeros tres kilómetros). Los radares CASA se instalarán en mástiles utilizados para telefonía celular u otra infraestructura existente con grandes capacidades de transmisión de datos. A diferencia de las actuales redes de radar preprogramadas, los radares CASA se comunicarán entre sí y adaptarán sus estrategias de detección en respuesta directa a las evoluciones meteorológicas y a las cambiantes necesidades de los usuarios. Estos datos del radar pueden incorporarse en modelos de predicción meteorológica numéricos para obtener una inicialización de datos más completa.

Debe realizarse un seguimiento de estas futuras tendencias y, a medida que evolucione la tecnología, tendrán repercusiones sobre cualquier futura estrategia para reducir la interferencia y sobre las definiciones de los criterios de protección.

14 Conclusiones

Los radares meteorológicos en tierra funcionan y procesan las señales de manera diferente a otros radares y producen productos muy distintos a los de otros tipos de radares. Estas diferencias pueden afectar la forma de realizar los análisis de interferencia y la manera en que deben evaluarse los resultados de los análisis.

Los radares meteorológicos en tierra son específicos y utilizan estrategias de desplazamiento de antena distintas para realizar una exploración del volumen atmosférico alrededor del radar donde se está midiendo una representación completa de las condiciones atmosféricas. En comparación, la mayoría de los otros tipos de radares realizan seguimientos de blancos discretos y sólo interesan las señales de retorno para las células de distancia asociadas con los blancos. En los radares meteorológicos se procesan todas las células de distancia en todos los radiales.

Anexo 2

Características de los radares meteorológicos

1 Radares meteorológicos en la banda de frecuencias 2 700-2 900 MHz

Las características técnicas de los radares meteorológicos representativos que funcionan en la banda de frecuencias 2 700-2 900 MHz aparecen en el Cuadro 1. Sin embargo, el radar 1 puede funcionar hasta 3 000 MHz. Se trata de los sistemas de radares meteorológicos primarios utilizados para las actividades de planificación de vuelos. En todo el mundo se ubican a menudo en aeropuertos y proporciona evaluaciones precisas de las condiciones meteorológicas empleadas para gestionar las operaciones de vuelo. Estos radares funcionan 24 horas al día.

El radar 1 utiliza una tecnología de radar Doppler para observar la presencia y calcular la velocidad y dirección de movimiento de elementos meteorológicos importantes tales como tornados, huracanes y tormentas violentas. Este radar 1 también proporciona una medición cuantitativa en la zona de precipitación que desempeña un papel importante en la previsión hidrológica. Las capacidades de detección del desplazamiento y aparición de fenómenos meteorológicos importantes ofrecidas por este radar contribuyen a aumentar la precisión y oportunidad de los servicios de aviso. El radar 1 sobresale en la detección temprana de vientos perjudiciales y en la estimación de intensidades de lluvia que se utilizan para la previsión de crecidas en los ríos e inundaciones.

El radar 1 se utiliza en una red integrada que se extiende por todo Estados Unidos de América, Guam, Puerto Rico, Japón, Corea del Sur, China y Portugal. La banda de frecuencias 2 700-2 900 MHz ofrece excelentes características meteorológicas y de propagación para las previsiones del tiempo y difusión de avisos. Las mejoras previstas al radar deben ampliar su vida útil hasta 2040. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) informa que funcionan más de 320 radares meteorológicos en esta banda de frecuencias en al menos 52 países de todo el mundo.

El radar 2 es un radar no Doppler utilizado en muchos países.

Los radares 3 y 4 combinan aplicaciones de aviación y meteorológicas en un único radar.

CUADRO 7

Características	Unidades	Radar 1*	Radar 2*	Radar 3	Radar 4
Gama de sintonía (MHz)	MHz	2 700-3 000	2 700-2 900	2 700-3 000 ⁽²⁾	2 700-3 000 ⁽²⁾
Modulación		P0N		P0N, Q3N	P0N, Q3N
Potencia de transmisión entregada a la antena	kW	500	400 ó 556	40	160
Ancho del impulso	µs	1,6 (impulso corto) 4,7 (impulso largo)	1,0 (impulso corto) 4,0 (impulso largo)	1,0 (impulso corto) 60,0 (impulso largo)	1,0 (impulso corto) ≤ 250,0 (impulso largo)
Tiempos de elevación/caída del impulso	µs	0,12		0,2 (impulso corto), 3 (impulso largo)	0,2 (impulso corto), 3 (impulso largo)
Frecuencia de repetición de impulsos o impulsos por segundo	Hz o pps	318-1 304 (impulso corto) 318-452 (impulso largo)	539 (impulso corto) 162 (impulso largo)	320-6 100 (impulso corto) 320-1 300 (impulso largo) Nota (3)	320-4 300 (impulso corto) 320-1 500 (impulso largo) Nota (3)
Ciclo de trabajo	%	0,21 máximo		0,2 ⁽⁴⁾ -0,6 (impulso corto) ≤ 12,0 ⁽⁵⁾ (impulso largo)	0,2 ⁽⁴⁾ -0,4 (impulso corto) ≤ 12,0 ⁽⁵⁾ (impulso largo)
Ancho de banda de la señal de chirrido	MHz	No aplicable	No aplicable	3	3
Anchura de su impulso codificado en fase		No aplicable	No aplicable	No aplicable	No aplicable
Relación de compresión		No aplicable	No aplicable	180	≤ 750

CUADRO 7 (cont.)

Características	Unidades	Radar 1*	Radar 2*	Radar 3	Radar 4
Anchura de banda de la emisión de RF: -40 dB -20 dB -6 dB -3 dB	MHz	4,6		10,4 (impulso corto)/6,2 (impulso largo) 1,3 (impulso corto)/2,0 (impulso largo)	10,4 (impulso corto)/6,2 (impulso largo) 1,3 (impulso corto)/2,0 (impulso largo)
Dispositivo de salida		Klystron	Magnetron coaxial	Estado sólido	Estado sólido
Tipo de diagrama de antena (estrecho, en abanico, cosecante cuadrado, etc.)		Estrecho	Estrecho	Cobertura de haz estrecho a 70 000 pies	Cobertura de haz estrecho a 100 000 pies
Tipo de antena (reflector, controlado por fase, sistema ranurado, etc.)		Reflector parabólico	Reflector parabólico	Sistema en fase, 4 caras (sistema en fase de 4 metros de diámetro por cara)	Sistema en fase, 4 caras (sistema en fase de 8 metros de diámetro por cara)
Polarización de la antena		Lineal: vertical y horizontal	Lineal: horizontal	Lineal: horizontal y vertical; circular	Lineal: horizontal y vertical; circular
Ganancia del haz principal de la antena	dBi	45,7	38,0	41	46
Anchura de haz en elevación de la antena	grados	0,92	2,0	1,6-2,7	0,9-1,5
Anchura de haz acimutal de la antena	grados	0,92	2,0	1,6-2,7	0,9-1,4
Velocidad de exploración horizontal de la antena	grados/s	18	18 y orientación de la radiación plenamente manual	No aplicable	No aplicable
Tipo de exploración horizontal de la antena (continua, aleatoria, 360°, sectorial, etc.)		360° y sectorial	360° y sectorial	Irregular para cubrir 360°	Irregular para cubrir 360°
Velocidad de exploración vertical de la antena	grados/s	14 pasos en 5 minutos		No aplicable	No aplicable
Tipo de exploración vertical de la antena (continua, aleatoria, 360°, sectorial, etc.)	grados	Pasos fijos: 0,5-20	-2,0 a +60	Irregular para cubrir el volumen requerido	Irregular para cubrir el volumen requerido

CUADRO 7 (fin)

Características	Unidades	Radar 1*	Radar 2*	Radar 3	Radar 4
Niveles del lóbulo lateral de la antena (SL) (1er lóbulo lateral y lóbulos laterales distantes)	dB _i	20	+15 (estimado)	17 en transmisión 25 en recepción	17 en transmisión 25 en recepción
Altura de la antena	m	30	30	Variable	Variable
Ancho de banda IF del receptor	MHz	0,63 a -3 dB	0,25 a -3 dB (impulso largo) 0,5 a -3 dB (impulso corto)	1,2 a -6 dB (impulso corto) 1,8 a -6 dB (impulso largo)	1,2 a -6 dB (impulso corto) 1,6 a -6 dB (impulso largo)
Factor de ruido del receptor	dB	2,1	9,0	< 6	< 6
Mínima señal discernible	dBm dBm/M Hz	-115	-110	-110	-110
Punto de compresión de ganancia 1 dB en la etapa de entrada del receptor	dBm	-17	-32	10	10
Nivel de saturación de sintonía del receptor	dBm	-10		No aplicable	No aplicable
Ancho de banda a 3 dB en RF del receptor	MHz	1,6	0,5 (impulso largo) 1,5 (impulso corto)	200	300
Niveles de saturación en RF y FI del receptor y tiempos de recuperación	dBm μs	-10, 1		13 < 0,5	13 < 0,5
Anchura de banda de filtrado Doppler	Hz	95 ⁽¹⁾ (estimación)			
Características de rechazo de interferencia					
Distribución geográfica		En todo el mundo			
Fracción de tiempo en utilización	%	100			

(1) Supresión del filtrado Doppler y del impulso de saturación.

(2) Gama de sintonización de 2,7-2,9 GHz cuando se realiza la función de radionavegación aeronáutica.

(3) FRI muy elevadas utilizadas sólo con grandes ángulos de elevación.

(4) El ciclo de trabajo de un impulso corto es del 0,2% en el barrido con la elevación más baja (horizonte).

(5) La combinación del ancho del impulso y la FRI se ajustará para mantener el ciclo de trabajo por debajo del 12%.

2 Radares meteorológicos en la gama de frecuencias 5 250-5 725 MHz

Los radares meteorológicos a bordo de aeronaves y en tierra funcionan en la gama de frecuencias 5 250-5 850 MHz. Las características técnicas de los radares en tierra figuran en el Cuadro 8.

Cabe observar que algunos servicios meteorológicos explotan radares no giratorios específicos en esta gama de frecuencias para realizar un seguimiento y localizar radiosondas que no tienen

características de radionavegación. Estos radares difieren principalmente de los radares meteorológicos en que hacen uso de impulsos de menor anchura (hasta 0,2 μ s) y una vez enganchados a una radiosonda siguen su trayectoria hasta el final del lanzamiento. Estos radares no quedan contemplados en la presente Recomendación.

Además, los radares meteorológicos a bordo de aeronaves se utilizan para reconocimiento e investigación de huracanes. La aeronave penetra varias veces la pared del ojo del huracán a distintas altitudes entre 1 500 (457 m) y 20 000 (6096 m) pies. La aeronave recopila datos de la misión de investigación que son críticos para establecer modelos informáticos que predicen la intensidad y la localización del huracán. Otras aeronaves penetran en los huracanes a altitudes mayores y menos turbulentas (30 000-45 000 pies, ó 9 144-13 716 m) para determinar la posición del ojo del huracán. Estos radares no quedan contemplados en la presente Recomendación.

Hay que señalar que los radares meteorológicos en tierra pueden funcionar teóricamente en toda la gama de frecuencias 5 250-5 850 MHz, pero su funcionamiento se limita generalmente a la gama de frecuencias 5 430-5 725 MHz. La mayoría de estos radares funcionan en la banda de frecuencias 5 600-5 650 MHz.

CUADRO 8

Características	Unidades	Radar 1	Radar 2	Radar 3	Radar 4	Radar 5
Gama de sintonía	MHz	5 300-5 700	5 600-5 650	5 600-5 650	5 300-5 700	5 600-5 650
Potencia de transmisión entregada a la antena	kW de cresta W media	250 125	250 1 500	250	250	250
Anchura del impulso	μ s	2,0	0,05-18	1,1	0,8-2,0	3,0
Tiempo de elevación/caída del impulso	μ s	0,2	0,005	0,11	0,08	0,3
Frecuencia de repetición de impulsos	pps	50, 250 y 1 200	0-4 000	2 000	250-1 180	259
Dispositivo de salida		Magnetrón coaxial	Klystron	Klystron	Magnetrón sintonizable	Magnetrón coaxial
Tipo de diagrama de antena (estrecho, en abanico, cosecante cuadrado, etc.)		Cónico	Estrecho	Estrecho	Estrecho	Estrecho
Tipo de antena (reflector, controlado por fase, sistema ranurado, etc.)		Parabólica de metal sólido	Parabólica	Parabólica	Parabólica	Parabólica sólida
Polarización de la antena		Vertical	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal
Ganancia del haz principal de la antena	dBi	39	44	50	40	40
Anchura de haz en elevación de la antena	grados	4,8	0,95	< 0,55	< 1,0	1,65
Anchura de haz acimutal de la antena	grados	0,65	0,95	< 0,55	< 1,0	1,65
Velocidad de exploración horizontal de la antena	grados/s	0,65	0-36 (0-6 rpm)	21-24	30-48	30-48
Tipo de exploración horizontal de la antena (continua, aleatoria, 360°, sectorial, etc.)	grados	360	360	Sector continuo de 360°	360	360
Velocidad de exploración vertical de la antena	grados/s	No disponible	No disponible	15	15	15

Características	Unidades	Radar 1	Radar 2	Radar 3	Radar 4	Radar 5
Tipo de exploración vertical de la antena (continua, aleatoria, 360°, sectorial, etc.)	grados	No disponible	No disponible	Escalonada, 0,5-60	Escalonada, -2 a +60	-1 a +60
Niveles del lóbulo lateral de la antena (primer lóbulo lateral y lóbulos laterales distantes)	dB	-26	-35	-27	-25	-25
Altura de la antena	m	30	10	30	30	30
Anchura de banda a 3 dB de la FI del receptor	MHz	0,5	20	0,91	0,6	0,25 a 0,5
Factor de ruido del receptor	dB	7	4	2,3	3	3

CUADRO 8 (cont.)

Características	Unidades	Radar 6	Radar 7	Radar 8	Radar 9	Radar 10
Mínima señal discernible	dBm	-110	-97	-109	-109 a -112	-114
Gama de sintonía	MHz	5 600-5 650	5 600-5 650	5 250-5 725	5 600-5 650	5 600-5 650
Modulación		Convencional	Con capacidad Doppler	Con capacidad Doppler	Con capacidad Doppler	Con capacidad Doppler (incluida la calibración del ruido sin emisión)
Potencia de transmisión entregada a la antena	kW de cresta W media	250 150	250 150	2,25	250	250
Anchura del impulso	µs	0,8-5	0,8-5	0,1	0,8-2, 5 y 10	0,5 a 3,3
Tiempo de elevación/caída del impulso	µs	0,2-2	0,2-2	0,005		
Frecuencia de repetición de impulsos	pps	250-1 200	50-1 200	100 000	50-1 200 Fijo y por etapas	250-1 200 Fijo, entrelazado y por etapas
Dispositivo de salida		Magnetron coaxial o Klystron	Magnetron coaxial	Magnetron coaxial	Magnetron coaxial	Magnetron coaxial
Tipo de diagrama de antena (estrecho, en abanico, cosecante cuadrado, etc.)		Estrecho	Estrecho	Estrecho	Estrecho	Estrecho
Tipo de antena (reflector, controlado por fase, sistema ranurado, etc.)		Parabólica sólida	Parabólica sólida	Parabólica sólida	Parabólica sólida	Parabólica sólida
Polarización de la antena		Horizontal y/o vertical	Horizontal o vertical	Horizontal o vertical	Horizontal	Horizontal y vertical
Ganancia del haz principal de la antena	dBi	40-50	40-50	35-45	44-48	45
Anchura de haz en elevación de la antena	grados	0,5-2	0,5-2	2,4-12	0,65-1	0,9
Anchura de haz acimutal de la antena	grados	0,5-2	0,5-2	1,5-12	0,65-1	0,9

CUADRO 8 (cont.)

Características	Unidades	Radar 6	Radar 7	Radar 8	Radar 9	Radar 10
Velocidad de exploración horizontal de la antena	grados/s rpm	6-18 1-3	6-18 1-3	1,2	3-36 0,5-6	6-36 1-6
Tipo de exploración horizontal de la antena (continua, aleatoria, 360°, sectorial, etc.)	grados	360	360	360	360	360
Velocidad de exploración vertical de la antena	grados/s	1-10	1-14	No disponible		
Tipo de exploración vertical de la antena (continuo, aleatorio, 360°, sectorial, etc.)	grados	-1 a +90	-5 a +90	No disponible	-2 a +90	-2 a +90
Niveles del lóbulo lateral de la antena (primer lóbulo lateral y lóbulos laterales distantes)	dB	-25 a -35	-25 a -35	-20	-25 a -45	-25 a -45
Altura de la antena	m	6-30	6-30	10	6-30	7-30
Anchura de banda a 3 dB de la FI del receptor	MHz	0,7 a 4	0,1 a 3,0	10	0,1 a 1,25	0,3 a 2
Factor de ruido del receptor	dB	3,5-8	1,5-8	3	3	3
Mínima señal discernible	dBm	-113 a -120	-113 a -120	-113 a -118	-30 a -54 (a 1 km)	-107 a -115

CUADRO 8 (cont.)

Características	Unidades	Radar 11	Radar 12	Radar 13
Gama de sintonía	MHz	5 250-5 350	5 330-5 370	5 250-5 370
Modulación		Convencional	Con capacidad Doppler	Con capacidad Doppler
Potencia de transmisión entregada a la antena	kW de cresta	250	250	200
Ancho del impulso	µs	2,5-2,8	1 y 2,5	1
Tiempo de elevación/caída del impulso	µs	0,1-0,8	0,1-0,9	0,2-0,5
Frecuencia de repetición de impulsos	pps	260	260-1 500	400-2 000
Dispositivo de salida		Magnetron coaxial	Klystron	Klystron
Tipo de diagrama de antena (estrecho, en abanico, cosecante cuadrado, etc.)		Estrecho	Estrecho	Estrecho
Tipo de antena (reflector, controlado por fase, sistema ranurado, etc.)		Parabólico	Parabólico	Parabólico
Polarización de la antena		Horizontal	Horizontal	Horizontal
Ganancia del haz principal de la antena	dBi	41-45	42-45	48-50
Ancho de haz en elevación de la antena	grados	1-1,5	1-1,2	0,58-0,65
Ancho de haz acimutal de la antena	grados	1-1,5	1-1,2	0,6-0,65
Velocidad de exploración horizontal de la antena	grados/s	24	6-36	12/24

CUADRO 8 (cont.)

Características	Unidades	Radar 11	Radar 12	Radar 13
Tipo de exploración horizontal de la antena (continua, aleatoria, 360°, sectorial, etc.)	grados	360	360	360
Velocidad de exploración vertical de la antena	grados/s	-2 a +45 en 15 s	-2 a +45 en 15 s	-2 a +90 en 10 s
Tipo de exploración vertical de la antena (continuo, aleatorio, 360°, sectorial, etc.)	grados	-2 a +45	-2 a +45	-2 a +90
Niveles del lóbulo lateral de la antena (primer lóbulo lateral y lóbulos laterales distantes)	dB	-25 a -33	-26 a -35	-28 a -34
Altura de la antena	m	18 a 53	10 a 60	33 a 44
Ancho de banda a 3 dB de la FI del receptor	MHz	1,2 a 1,6	0,4 a 1,4	1,0 a 1,4
Factor de ruido del receptor	dB	1,2-5	1,9-3	1-2
Mínima señal discernible	dBm	-108 a -114	-110 a -114	-110 a -112

CUADRO 8 (fin)

Características	Unidades	Radar 14
Gama de sintonización	MHz	5 430-5 470
Modulación		Con capacidad Doppler
Potencia de transmisión entregada a la antena	kW de cresta	250
Ancho del impulso	μs	0,5
Tiempo de elevación/caída del impulso	μs	0,25-0,30
Frecuencia de repetición de impulsos	pps	600-1 500
Dispositivo de salida		Magnetron coaxial
Tipo de diagrama de antena (estrecho, en abanico, cosecante cuadrado, etc.)		Estrecho
Tipo de antena (reflector, controlado por fase, sistema ranurado, etc.)		Parabólico sólido
Polarización de la antena		Horizontal y vertical
Ganancia del haz principal de la antena	dBi	45
Ancho de haz en elevación de la antena	grados	1
Ancho de haz acimutal de la antena	grados	1
Velocidad de exploración horizontal de la antena	grados/s	18-48
Tipo de exploración horizontal de la antena (continua, aleatoria, 360°, sectorial, etc.)	grados	360
Velocidad de exploración vertical de la antena	grados/s	20 en 5 min
Tipo de exploración vertical de la antena (continua, aleatoria, 360°, sectorial, etc.)	grados	-0,2 a +40
Niveles del lóbulo lateral de la antena (primer lóbulo lateral y lóbulos laterales distantes)	dB	-28
Altura de la antena	m	5-45
Ancho de banda a 3 dB de la FI del receptor	MHz	2,0
Factor de ruido del receptor	dB	1,8
Mínima señal discernible	dBm	-110

3 Radares meteorológicos en la banda 9 300-9 500 MHz

Cabe señalar que los radares meteorológicos en tierra pueden funcionar teóricamente en toda la gama de frecuencias 8 500-10 500 MHz pero, en general, se limitan a la banda de frecuencias 9 300-9 500 MHz. Sus características técnicas figuran en el Cuadro 9.

CUADRO 9

Características	Unidades	Radar 1	Radar 2	Radar 3
Gama de sintonía	MHz	9 300-9 375	9 200-9 500	9 375
Modulación		Por impulsos	Por impulsos	Por impulsos
Potencia de cresta entregada a la antena	kW de cresta	50	250	35 (por polarización)
Anchura del impulso	µs	0,1, 0,25 y 1,0	0,5, 1,0, 0,8 y 2,0	1 y 2
Frecuencia de repetición de impulsos	pps	1 000 a 2 000	1 500 a 250	500
Máximo ciclo de trabajo	%	0,002	No especificado	No especificado
Tiempo de elevación/caída del impulso	µs	0,05	No especificado	No especificado
Dispositivo de salida		Klystron o Magnetrón	Magnetrón	Magnetrón
Tipo de diagrama de antena		Haz estrecho	Haz estrecho	Haz estrecho
Tipo de antena		Reflector parabólico con alimentador Cassegrain	Reflector parabólico	Reflector parabólico
Polarización de la antena		Lineal (polarización doble)	Lineal	Lineal (polarización doble)
Ganancia del haz principal de la antena	dBi	46	45	40
Anchura de haz en elevación de la antena	grados	0,9	< 1,0	1,5
Anchura de haz acimutal de la antena	grados	0,9	< 1,0	1,5
Velocidad de exploración horizontal de la antena	grados/s	0 a 20	0 a 36	6
Tipo de exploración horizontal de la antena (continua, aleatoria, sectorial, etc.)	grados	Volumen, volumen del sector, estacionaria y de seguimiento	Volumen	Volumen
Exploración vertical de la antena	grados/s	0° a 20°	No especificada	0° a 90°
Tipo de exploración vertical de la antena	grados	Escalonada hasta la siguiente elevación tras rotación horizontal o cambio de elevación con acimut constante	Escalonada hasta la siguiente elevación tras rotación horizontal	No especificada
Niveles del lóbulo lateral de la antena (primeros lóbulos laterales y lóbulos laterales distantes)	dBi	26	16	10 (primer lóbulo lateral) 0 (lóbulo lateral distante)
Altura de la antena	m	4 m	2 a 30 m	5 a 15 m
Anchura de banda a 3 dB de la FI del receptor	MHz	10, 4 ó 1	No especificada	No especificada

CUADRO 9 (*fin*)

Características	Unidades	Radar 1	Radar 2	Radar 3
Ruido de fondo del receptor	dB	-110	-114	-113
Pérdidas en el receptor	dBm	No especificada	No especificada	No especificada
Anchura de banda de la señal de chirrido		No disponible	No disponible	No disponible
Anchura de banda de la emisión en RF 3 dB -20 dB	MHz	No especificada 6 a 60 – dependiendo de la anchura del impulso	No especificada No especificada	1 6