

RECOMENDACIÓN UIT-R M.1464-1*

Características de los radares de radiolocalización y características y criterios de protección para estudios de compartición de los radares de radionavegación aeronáutica y meteorológicos en el servicio de radiodeterminación que funcionan en la banda de frecuencias 2 700-2 900 MHz

(Cuestión UIT-R 35/8)

(2000-2003)

Resumen

La presente Recomendación se debe utilizar para realizar análisis entre sistemas que funcionan en el servicio de radiodeterminación y sistemas que funcionan en otros servicios. No debe ser utilizada para análisis de radar a radar.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que las características en cuanto a antena, propagación de la señal, detección del objetivo y gran anchura de banda necesaria de los radares para lograr sus funciones son óptimas en ciertas bandas de frecuencia;
- b) que las características técnicas de los radares de radionavegación aeronáutica y meteorológicos vienen determinadas por la misión del sistema y varían ampliamente incluso dentro de una banda;
- c) que el servicio de radionavegación es un servicio de seguridad, tal como se especifica en el número 4.10 del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR), y no puede aceptarse el que se le cause interferencia perjudicial;
- d) que desde la CAMR-79 se han eliminado o degradado atribuciones considerables de espectro (equivalente a unos 1 GHz) a la radiolocalización y la radionavegación;
- e) que algunos grupos técnicos del UIT-R están considerando la posibilidad de introducir nuevos tipos de sistemas (por ejemplo, el acceso fijo inalámbrico y los sistemas fijos y móviles de gran densidad) o servicios en las bandas comprendidas entre 420 MHz y 34 GHz utilizadas por los radares de radiodeterminación y meteorológicos;
- f) que se requieren características técnicas y operacionales representativas de los radares de radiodeterminación y meteorológicos a fin de determinar la viabilidad de la introducción de nuevos tipos de sistemas en las bandas de frecuencia en que éstos funcionan;

* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de la Organización de la Aviación Civil Internacional (OACI) y de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

g) que se necesitan procedimientos y metodologías para analizar la compatibilidad entre los radares de radiodeterminación y meteorológicos y los sistemas de otros servicios,

h) que los radares con base en el suelo utilizados con fines meteorológicos están autorizados a funcionar en esta banda sobre una base de igualdad con las estaciones del servicio de radionavegación aeronáutica (número 5.423 del RR);

j) que los radares en esta banda se emplean para vigilancia del campo de aterrizaje que es un servicio de seguridad crítico en los campos de aviación, que guía a la aeronave para evitar colisiones durante las fases de aproximación y aterrizaje. Las autoridades de reglamentación de la aviación aseguran y preservan la seguridad e imponen normas obligatorias para el funcionamiento y la degradación mínima del servicio,

reconociendo

1 que los criterios de protección dependen de los tipos específicos de señales interferentes, tales como las descritas en los Anexos 2 y 3;

2 que la aplicación de los criterios de protección exige el examen de la incorporación del carácter estadístico de los criterios y otros elementos de la metodología para efectuar estudios de compatibilidad (por ejemplo, exploración de la antena y pérdidas del trayecto de propagación). En las futuras revisiones de esta Recomendación y de otras Recomendaciones conexas pueden incorporarse nuevos desarrollos de estas consideraciones estadísticas, según el caso,

recomienda

1 que se consideren las características técnicas y operacionales de los radares de radionavegación aeronáutica y meteorológicos descritas en el Anexo 1, como representativas de los que funcionan en la banda de frecuencias 2 700-2 900 MHz;

2 que se emplee la Recomendación UIT-R M.1461 como guía en el análisis de la compatibilidad entre los radares de radionavegación aeronáutica y meteorológicos con los sistemas de otros servicios;

3 que el nivel desencadenante de protección de los radares de radionavegación aeronáutica se basen en el Anexo 2, en particular el § 4, para evaluar la compatibilidad con tipos de señales interferentes de otros servicios representativos de los indicados en el Anexo 2. Estos criterios de protección representan el nivel de protección combinada si están presentes múltiples fuentes de interferencia;

4 que el nivel desencadenante de protección para radares meteorológicos se basen en el Anexo 3, en particular el § 7, para evaluar la compatibilidad con tipos de señales interferentes de otros servicios representativos de los indicados en el Anexo 3. Estos criterios de protección representan el nivel de protección combinada si están presentes múltiples fuentes de interferencia.

NOTA 1 – Esta Recomendación será revisada cuando se disponga de información más detallada.

Anexo 1

Características de los radares de radionavegación aeronáutica y meteorológicos

1 Introducción

La banda 2700-2900 MHz está atribuida al servicio de radionavegación aeronáutica con carácter primario y al servicio de radiolocalización con carácter secundario. Los radares con base en el suelo utilizados para fines meteorológicos están autorizados a funcionar en esta banda sobre la base de igualdad con las estaciones del servicio de radionavegación aeronáutica (número 5.423 del RR).

Los radares de radionavegación aeronáutica se utilizan para el control del tráfico aéreo (ATC) en los aeropuertos y realizan un servicio de seguridad (número 4.10 del RR). Los datos revelan que ésta es la banda predominante para los radares de aproximación terminal y vigilancia de aeropuerto en el tráfico aéreo civil de todo el mundo. Los radares meteorológicos se utilizan para la detección de los eventos meteorológicos graves tales como tornados, huracanes y tormentas violentas. Estos radares meteorológicos dan también mediciones cuantitativas de la precipitación en ciertas zonas que son de gran importancia para la predicción hidrológica de las posibles riadas. Dicha información se utiliza para emitir los avisos al público y supone por tanto un servicio de seguridad de la vida humana.

2 Características técnicas

La banda 2700-2900 MHz está utilizada por diversos tipos distintos de radares en plataformas fijas en el suelo y transportables. Las funciones que realizan los sistemas de radar en esta banda incluyen el ATC y la observación meteorológica. Puede suponerse que las frecuencias de funcionamiento radar se distribuyen uniformemente en la banda 2700-2900 MHz. La mayoría de los sistemas utilizan más de una frecuencia para lograr las ventajas de la diversidad de frecuencia. El uso de dos frecuencias es muy común y el uso de cuatro no es desconocido. El Cuadro 1 contiene las características técnicas de los radares representativos de radionavegación aeronáutica y meteorológicos que funcionan en la banda 2700-2900 MHz. Esta información es suficiente para los cálculos generales destinados a evaluar la compatibilidad entre dichos radares y otros sistemas.

2.1 Transmisores

Los radares que funcionan en la banda 2700-2900 MHz utilizan impulsos de onda continua e impulsos modulados en frecuencia (comprimidos). En las etapas finales de los transmisores se utilizan dispositivos de salida de campo transversal, haz lineal y estado sólido. La tendencia en los nuevos sistemas de radar se orienta hacia los dispositivos de salida de haz lineal y estado sólido debido al requisito de procesamiento de la señal Doppler. Además, los radares que emplean dispositivos de salida de estado sólido tienen una potencia de salida de cresta del transmisor inferior y ciclos de trabajo de impulsos superiores que llegan hasta el 10%. También hay la tendencia hacia sistemas de radar de radionavegación con diversidad de frecuencias.

Las anchuras de banda de emisión de RF típicas en el transmisor de los radares que funcionan en la banda 2700-2900 MHz oscilan entre 66 kHz y 6 MHz. Las potencias de salida de cresta del transmisor van desde 22 kW (73,4 dBm) para los transmisores de estado sólido, 70 kW (78,5 dBm) para sistemas de tubos de ondas progresivas (TOP), a 1,4 MW (91,5 dBm) para los radares de gran potencia que utilizan klystrons y magnetrons.

En los sistemas de potencia de cresta alta, es normal tener un solo transmisor por frecuencia y estos tienden a tener etapas de salida de banda estrecha. Los sistemas de potencia de cresta más baja que utilizan TOP o de estado sólido tienen transmisores capaces de funcionamiento multifrecuencia, y que tienen por tanto etapas de salida de banda ancha capaces de utilizar multifrecuencia.

CUADRO 1

**Características de los radares de radionavegación aeronáutica
que funcionan en la banda 2 700-2 900 MHz**

Características	Radar A	Radar B	Radar C	Radar D	Radar E	Radar F
Tipo plataforma (en aeronave, en un barco, en el suelo)	Suelo, ATC					
Gama de sintonía (MHz)	2 700-2 900 ⁽¹⁾					
Modulación	P0N		P0N, Q3N	P0N	P0N, Q3N	P0N, Q3N
Potencia del transmisor a la antena ⁽²⁾	1,4 MW	1,32 MW	25 kW	450 kW	22 kW	70 kW
Ancho del impulso (µs)	0,6	1,03	1,0, 89	1,0	1,0, 55,0	0,4, 20 0,5, 27 ⁽³⁾
Tiempo de elevación/caída del impulso (µs)	0,15-0,2		0,5/0,32 (impulso corto) 0,7/1 (impulso largo)			0,1 típico
Tasa de repetición de impulsos (pps)	973-1 040 (seleccionable)	1 059-1 172	722-935 (impulso corto) 788-1 050 (impulso largo)	1 050	8 fijaciones, 1 031 a 1 080	1 100 840 ⁽³⁾
Ciclo de trabajo (%)	0,07 máximo	0,14 máximo	9,34 máximo	0,1 máximo		2 típico
Ancho de banda de impulsos (MHz)	No aplicable		2	No aplicable	1,3 no lineal MF	2
Ancho del subimpulso codificado en fase	No aplicable					
Relación de compresión	No aplicable		89	No aplicable	55	40:1 55:1
Anchura de banda de emisión RF: -20 dB	6 MHz	5 MHz	2,6 MHz (impulso corto) 5,6 MHz (impulso largo) 1,9 MHz			3 MHz típica
3 dB		600 kHz				
Dispositivo de salida	Klystron		Transistores de estado sólido, Clase C	Magnetron	Transistor de estado sólido, Clase C	TOP
Tipo de diagrama de antena (puntual, abanico, cosecante cuadrado, etc.) (grados)	Cosecante cuadrado +30		Cosecante cuadrado 6 a +30			Cosecante cuadrada ampliada a +40
Tipo de antena (reflector, sistema en fase, sistema de ranuras, etc.)	Reflector parabólico					
Polarización de la antena	Vertical o circular levógira	Vertical o circular dextrógira	Circular o lineal	Vertical o circular levógira	Vertical o circular dextrógira	Circular levógira

CUADRO 1 (Fin)

Características	Radar A	Radar B	Radar C	Radar D	Radar E	Radar F
Ganancia del haz principal de la antena (dBi)	33,5		34	32,8	34,3 haz bajo 33 haz alto	33,5
Abertura del haz en elevación de la antena (grados)	4,8			4	4,8	5,0
Apertura del haz acimutal de la antena (grados)	1,35	1,3	1,45	1,6	1,4	1,5
Velocidad de exploración horizontal de la antena (grados/s)	75			90	75	90 60 ⁽³⁾
Tipo de exploración horizontal de la antena (continua, aleatoria, 360°, sectorial, etc.)	360°					
Velocidad de exploración vertical de la antena (grados/s)	No aplicable					
Tipo de exploración vertical de la antena (continua, aleatoria, 360°, sectorial, etc.) (grados)	No aplicable		+2,5 a -2,5	No aplicable	No aplicable	No aplicable
Niveles de los lóbulos laterales de la antena (primer lóbulo lateral y lóbulos laterales distantes)		+7,3 dBi	+9,5 dBi 3,5°			+7,5 dBi 0 a -3 dBi
Altura de la antena (m)	8					8 a 24
Anchura de banda de 3 dB de FI del receptor	5 MHz	653 kHz	15 MHz		1,2 MHz	4 MHz
Factor de ruido del receptor (dB)	4,0 máximo		3,3	2,7	2,1	2,0
Señal discernible mínima (dBm)	-110	-108	-110	-112		-110 típico
Punto de compresión de ganancia 1 dB del primer paso del receptor (dBm)		-20				-10
Nivel de saturación en sintonía del receptor (dBm)		-45				
Anchura de banda de 3 dB de RF del receptor (MHz)	2-2,3	10	280,6			400 ⁽¹⁾
Niveles de saturación y tiempos de recuperación en RF y en FI del receptor						
Anchura de banda del filtrado Doppler (Hz)		95 por intervalo				
Características de rechazo de interferencia ⁽⁴⁾	Mejora por realimentación	⁽⁵⁾				
Distribución geográfica	Todo el mundo					
Fracción del tiempo de utilización (%)	100					

(1) 2,7 a 3,1 GHz.

(2) Los sistemas fijos funcionan hasta 750 kW o 1 MW.

(3) Depende de la distancia.

(4) A continuación se representan las características que están presentes en la mayoría de los sistemas de radar como parte de su función normal: Control del tiempo de sensibilidad (STC), tasa de falsas alarmas constante (CFAR), rechazo de impulsos asíncronos, eliminación de impulsos de saturación.

(5) A continuación se representan las características que están disponibles en algunos sistemas de radar: frecuencias de repetición de impulsos (FRI) seleccionables, filtrado Doppler.

CUADRO 2

**Características de radares meteorológicos que funcionan
en la banda 2 700-2 900 MHz**

Características	Radar G	Radar H
Tipo de plataforma (en aeronave, en un barco, en el suelo)	Suelo, meteorología	Suelo, meteorología
Gama de sintonía (MHz)	2 700-3 000	2 700-2 900
Modulación	P0N	
Potencia del transmisor a la antena (kW)	500	400 ó 556
Anchura del impulso (µs)	1,6 (impulso corto) 4,7 (impulso largo)	1,0 (impulso corto) 4,0 (impulso largo)
Tiempo de elevación/caída del impulso (µs)	0,12	
Tasa de repetición de impulsos (pps)	318-1 304 (impulso corto) 318-452 (impulso largo)	539 (impulso corto) 162 (impulso largo)
Ciclo de trabajo (%)	0,21 máximo	
Anchura de banda de impulsos	No aplicable	No aplicable
Anchura del subimpulso codificado en fase	No aplicable	No aplicable
Relación de compresión	No aplicable	No aplicable
Anchura de banda de emisión RF: -20 dB 3 dB	4,6 MHz 600 kHz	
Dispositivo de salida	Klystron	Magnetron coaxial
Tipo de diagrama de antena (puntual, abanico, cosecante cuadrado, etc.)	Puntual	Puntual
Tipo de antena (reflector, sistema en fase, sistema de ranuras, etc.)	Reflector parabólico	Reflector parabólico
Polarización de la antena	Lineal: vertical y horizontal	Lineal: horizontal
Ganancia del haz principal de la antena (dBi)	45,7	38,0
Apertura del haz en elevación de la antena (grados)	0,92	2,0
Apertura del haz acimutal de la antena (grados)	0,92	2,0
Velocidad de exploración horizontal de la antena (grados/s)	18	18 y reorientación totalmente manual

CUADRO 2 (Fin)

Características	Radar G	Radar H
Tipo de exploración horizontal de la antena (continua, aleatoria, 360°, sectorial, etc.)	360° y sector	360° y sector
Velocidad de exploración vertical de la antena (grados/s)	14 pasos en 5 min	
Tipo de exploración vertical de la antena (continua, aleatoria, 360°, sectorial, etc.) (grados)	Pasos fijos 0,5-20	-2,0 a +60
Niveles de los lóbulos laterales de la antena (primer lóbulo lateral y lóbulos laterales distantes) (dBi)	+20	+15 (estimado)
Altura de la antena (m)	30	30
Anchura de banda de 3 dB de FI del receptor	630 kHz	0,25 MHz (impulso largo) 0,5 MHz (impulso corto)
Factor de ruido del receptor (dB)	2,1	9,0
Señal discernible mínima (dBm)	-115	-110
Punto de compresión de ganancia 1 dB del primer paso del receptor (dBm)	-17	-32
Nivel de saturación en sintonía del receptor (dBm)	-10	
Anchura de banda de 3 dB de RF del receptor (MHz)	1,6	0,5 (impulso largo) 1,5 (impulso corto)
Niveles de saturación y tiempos de recuperación en RF y en FI del receptor	-10 dBm, 1 μ s	
Anchura de banda del filtrado Doppler (Hz)	Estimación 95 ⁽¹⁾	
Característica de rechazo de interferencia		
Distribución geográfica	Todo el mundo	
Fracción del tiempo de utilización (%)	100	

⁽¹⁾ Filtrado Doppler y eliminación de impulsos de saturación.

CUADRO 3

**Características de radares de radiolocalización militares genéricos
que funcionan en la banda 2 700-3 400 MHz**

Características	Radar I	Radar J	Radar K	Radar L
Tipo de plataforma (en aeronave, en un barco, en el suelo)	Suelo, ATC emisor de relleno costero	2D/3D vigilancia naval defensas tierra	Defensa tierra aire	Varios tipos de multifunciones
Gama de sintonía (MHz)	2 700-3 100	2 700-3 100	2 700 a 3 100 2 900 a 3 400	Toda la anchura de banda hasta 25%
Frecuencias operacionales mínima/máxima	Mínima: 2 espaciadas en > 10 MHz Máxima: completamente ágil	Mínima: 2 espaciadas en > 10 MHz Máxima: completamente ágil	Mínima: fijas Máxima: completamente ágil	Mínima: 2 espaciadas en > 10 MHz Máxima: completamente ágil
Modulación	MF no-lineal P0N, Q3N	MF no-lineal P0N, Q3N	MF no-lineal Q3N	Mixta
Potencia del transmisor a la antena	60 kW típico	60 a 200 kW	1 MW típico	30 kW a 100 kW
Anchura del impulso (µs)	0,4 ⁽¹⁾ a 40	0,1 ⁽¹⁾ a 200	> 100	Hasta 2
Tiempo de elevación/caída del impulso (µs)	10 a 30 típico	10 a 30 típico	No comunicado	No comunicado
Frecuencia de repetición de impulsos (pps)	550 a 1 100 Hz	300 Hz a 10 kHz	< 300 Hz	Hasta 20 kHz
Coefficiente de utilización (%)	2,5 máxima	10 máxima	Hasta 3	30 máxima
Anchura de banda de modulación (MHz)	2,5	Hasta 10	> 100	Depende de la modulación
Anchura del subimpulso codificado en fase	No aplicable	No aplicable	No aplicable	No comunicado
Relación de compresión (MHz)	Hasta 100	Hasta 300	No aplicable	No comunicado
Anchura de banda de emisión RF (MHz): -20 dB -3 dB	3,5 2,5	15 10	> 100	No comunicado
Dispositivo de salida	TOP	TOP o estado sólido	Klystron CFA	Elementos activos
Tipo de diagrama de antena (puntual, abanico, cosecante cuadrado, etc.)	Cosecante cuadrado	Haz puntual 3D o cosecante cuadrado 2D	Haz puntual de barrido	Haz puntual
Tipo de antena (reflector, sistema en fase, sistema de ranuras, etc.)	Reflector conformado	Sistema de antenas planas o Reflector conformado	Sistema de antenas planas con exploración de frecuencia o reflector	Sistema de antenas activo
Apertura del haz acimutal de la antena (grados)	1,5	1,1 a 2	Típicamente 1,2	Depende del número de elementos
Polarización de la antena	Lineal o circular o conmutada	Lineal o circular o conmutada	Fija, lineal o circular	Alineador fijo
Ganancia del haz principal de la antena (dBi)	33,5 típico	Hasta 40	> 40	Hasta 43
Apertura del haz en elevación de la antena (grados)	4,8	1,5 a 30	Típico 1	Depende del número de elementos

CUADRO 3 (Fin)

Características	Radar I	Radar J	Radar K	Radar L
Velocidad de exploración horizontal de la antena (grados/s)	45 a 90	30 a 180	Típico 36	Exploración sectorial rotación instantánea hasta 360
Tipo de exploración horizontal de la antena (continua, aleatoria, 360°, sectorial, etc.) (grados)	Continuo 360	Continuo 360 + exploración sectorial	Continuo 360 + exploración sectorial	Exploración sectorial aleatoria + rotación
Velocidad de exploración vertical de la antena (grados)	No aplicable	Instantánea	Instantánea	Instantánea
Tipo de exploración vertical de la antena (continua, aleatoria, 360°, sectorial, etc.) (grados)	No aplicable	0 a 45	0 a 30	0 a 90
Niveles de lóbulos laterales de la antena (primer lóbulo lateral y lóbulos laterales distantes)	26 dB 35 dB	>32 dB típico <-10 dB	>26 dB típico < 0 dB	No comunicados
Altura de la antena (m) sobre el suelo	4 a 30	4 a 20	5	4 a 20
Anchura de banda FI del receptor (3 dB) (MHz)	1,5 largo 3,5 corto	10	No comunicada	No comunicada
Factor de ruido del receptor (dB) ⁽²⁾	2,0 máximo	1,5 máximo	No comunicado	No comunicado
Señal discernible m-mínima (dBm)	-123 impulso largo -104 impulso corto	No comunicada	No comunicada	No comunicada
Punto de compresión de la ganancia de 1 dB de la unidad frontal del receptor Densidad de potencia en la antena (W/m ²)	$1,5 \times 10^5$	5×10^5	1×10^6	1×10^3
Potencia de saturación del receptor en sintonía Densidad de potencia en la antena (W/m ²)	$4,0 \times 10^{10}$	1×10^{10}	No comunicada	No comunicada
Anchura de banda de 3 dB del receptor RF (MHz)	400	400	150 a 500	Hasta toda la banda
Niveles de saturación RF y FI del receptor y tiempos de recuperación	No comunicados	No comunicados	No comunicados	No comunicados
Anchura de banda de filtrado Doppler	No comunicada	No comunicada	No comunicada	No comunicada
Características de rechazo de interferencia ⁽³⁾	⁽⁴⁾	⁽⁴⁾ y ⁽⁵⁾	⁽⁴⁾ y ⁽⁵⁾	Formación de haz adaptable ⁽⁴⁾ y ⁽⁵⁾
Distribución geográfica	Todo el mundo sitio fijo transportable	Todo el mundo sitio fijo naval transportable	Todo el mundo sitio fijo transportable	Todo el mundo sitio fijo naval transportable
Fracción de tiempo de utilización (%)	100	Depende de la misión	Depende de la misión	Depende de la misión

(1) Impulso no comprimido.

(2) Incluye pérdidas del alimentador.

(3) A continuación se indican las características que están presentes en la mayoría de los sistemas de radar como parte de su función normal: STC, CFAR, rechazo de impulsos asíncronos, supresión de impulsos de saturación.

(4) A continuación se indican las características que están disponibles en la mayoría de los sistemas de radar: FRI seleccionables, filtrado de objetivos en movimiento, agilidad de frecuencia.

(5) Cancelación de lóbulo lateral, supresión de lóbulo lateral.

2.2 Receptores

La generación más reciente de sistemas de radar utiliza el procesamiento digital de la señal tras la detección para el alcance, el acimut y el procesamiento Doppler. Por lo general, el procesamiento de la señal incluye técnicas utilizadas para mejorar la detección de los blancos deseados y producir símbolos del blanco en la pantalla. Las técnicas de procesamiento de la señal utilizadas para la mejora e identificación de los blancos deseados dan también algún tipo de supresión de la interferencia de ciclo de trabajo corto, inferior al 5%, que es asíncrona respecto a la señal deseada.

Además, el procesamiento de la señal en los radares ATC de la generación más reciente utiliza impulsos con compresión que dan ganancia de procesamiento para la señal deseada y pueden también suprimir las señales no deseadas.

Algunos de los transmisores de estado sólido y baja potencia más recientes utilizan un procesamiento de la señal en canal de receptor múltiple con ciclo de trabajo elevado para mejorar los retornos de la señal deseada. Algunos receptores radar tienen capacidad para identificar canales de RF que tienen señales no deseadas de nivel reducido y controlan el transmisor para que transmita en estos canales de RF.

En general, los sistemas de potencia de cresta alta tienden a utilizar un receptor por frecuencia y por tanto tienen unidades frontales RF de banda estrecha. Los sistemas de potencia más baja tienden a tener unidades RF de banda ancha capaces de recibir todas las frecuencias sin sintonización, seguidas por receptores superheterodinos coherentes. Los sistemas que utilizan compresión de impulsos tienen su ancho de banda FI concordada con el impulso ampliado y actúan como filtros adaptados para la degradación mínima de la relación S/N .

Los radares meteorológicos, diseñados para seguir partículas en la atmósfera e hidrometeoros de tamaños de submilímetros, utilizan procesamiento extensivo para extraer señales del ruido recibido. La prueba realizada en un tipo de radar usado en todo el mundo caracterizó que este proceso de la ganancia sea del orden de 6 a 9 dB. Además, los radares meteorológicos detectan más que la simple presencia de un impulso devuelto hacia atrás. El procesamiento obtiene datos sobre las características de los impulsos devueltos para determinar factores tales como la velocidad del viento, el corte del viento, turbulencias y tipo de precipitaciones. El procesamiento, combinado con el hecho de que los radares meteorológicos requieren algo más que la detección de la presencia de un impulso devuelto en relaciones S/N negativas, los hace muy vulnerables a la interferencia. En el Anexo 3 a esta Recomendación figura información adicional.

2.3 Antenas

Los radares que funcionan en la banda 2700-2900 MHz utilizan únicamente antenas de tipo reflector parabólico. Los radares ATC tienen un diagrama de elevación de cosecante cuadrado, mientras que los radares meteorológicos presentan un diagrama de antena de haz estrecho. Como los radares que funcionan en la banda 2700-2900 MHz realizan funciones de ATC y de observación meteorológica, las antenas exploran un sector de 360° en el plano horizontal. Se utilizan polarizaciones horizontal, vertical y circular. Los radares de generación más reciente utilizan antenas de tipo reflector con bocinas múltiples. Se utilizan bocinas dobles en la transmisión y la recepción a fin de mejorar la detección de ecos parásitos de superficie. También se utilizan antenas de reflector con bocina múltiple y haz apilado en los radares tridimensionales. Las antenas de bocina múltiple reducen el nivel de la interferencia. Las alturas típicas de antena para los radares de radionavegación aeronáutica y meteorológicos son de 8 m y de 30 m sobre el nivel del suelo, respectivamente.

3 Criterios de protección

El efecto de desensibilización en los radares de radionavegación aeronáutica y meteorológicos procedente de otros servicios de una modulación onda continua, MDP-2, MDP-4 o de tipo similar a ruido se relaciona predeciblemente con su intensidad. En todo sector acimutal del que llegue dicha interferencia, su densidad espectral de potencia puede simplemente añadirse a la densidad espectral de potencia del ruido térmico del receptor radar, en una aproximación razonable. Si se denomina N_0 a la densidad espectral de potencia del ruido en el receptor radar en ausencia de interferencia e I_0 a la interferencia de tipo ruido, la densidad espectral de potencia de ruido efectiva resultante es simplemente la suma $I_0 + N_0$.

El factor de acumulación puede ser muy sustancial en el caso de ciertos sistemas de comunicaciones en los que puede instalarse un gran número de estaciones. Un análisis de la acumulación tiene que considerar las contribuciones acumuladas de todos los sentidos, recibidas por los lóbulos principal y/o laterales de la antena del radar para llegar a la relación I/N global.

El efecto de la interferencia impulsiva es más difícil de cuantificar y depende fuertemente del diseño de los receptores y el procesador, así como del modo de funcionamiento. En particular, las ganancias del procesamiento diferenciales para retornos de blanco válidos que son sincrónicos con los impulsos, y los impulsos de interferencia que generalmente son asíncronos, suelen tener efectos importantes en la repercusión de los niveles determinados de interferencia impulsiva. Este tipo de desensibilización puede dar lugar a diversas formas distintas de degradación de la calidad. La evaluación de éstas será un objetivo de los análisis de interacciones entre tipos específicos de radares. En general, cabe esperar que las numerosas características de los radares de radiodeterminación contribuyen a suprimir la interferencia impulsiva de ciclo de trabajo pequeño, especialmente la procedente de algunas fuentes aisladas. Las técnicas para suprimir la interferencia impulsiva con ciclo de trabajo corto figuran en la Recomendación UIT-R M.1372 – Utilización eficaz del espectro radioeléctrico por las estaciones del servicio de radiodeterminación.

4 Características operacionales

4.1 Radares meteorológicos

Las características técnicas de un radar meteorológico representativo que predominantemente funciona en la banda 2 700-2 900 MHz se representan en el Cuadro 2 como las de los radares G y H. No obstante, el radar G puede funcionar hasta en 3 000 MHz. Estos son los sistemas de radares meteorológicos primarios utilizados en las actividades de planificación de vuelos y suelen estar situados en el mismo emplazamiento de los aeropuertos por todo el mundo para dar las condiciones meteorológicas precisas a las aeronaves. De esta manera, estos radares funcionan 24 h al día.

El radar G utiliza la tecnología Doppler para observar la presencia de situaciones meteorológicas graves tales como tornados, huracanes y tormentas violentas, y calcular su velocidad y dirección del movimiento. El radar G realiza también mediciones cuantitativas de la precipitación de una zona que son muy importantes en las predicciones hidrológicas de las posibles riadas. La capacidad de detección de condiciones meteorológicas graves y de su movimiento que ofrece este radar contribuye a aumentar la precisión y la oportunidad de los servicios de alerta. El radar de tipo G es el más adecuado en la detección de situaciones meteorológicas graves que amenazan a la vida humana y las propiedades mediante la detección rápida de vientos peligrosos y la estimación de volúmenes de precipitación que se utilizan en las previsiones de caudales y riadas. El radar H es un radar no Doppler, utilizado en muchos países.

El radar G se usa en una red integrada que abarca la totalidad de Estados Unidos de América, Guam, Puerto Rico, Japón, Corea del Sur, China y Portugal. La banda de 2700-2900 MHz ofrece características excelentes en cuanto a la meteorología y la propagación para la previsión del tiempo atmosférico y las posibilidades de alerta. Las mejoras planificadas de este radar servirán para prolongar su vida en servicio hasta el año 2040. La OMM informa que más de 320 radares meteorológicos funcionan en esta banda por lo menos en 52 países en todo el mundo.

4.2 Radares de radionavegación aeronáutica

Los radares de vigilancia de aeropuertos funcionan por todo el mundo en la banda 2700-2900 MHz. El Cuadro 1 ilustra seis tipos representativos de radares de ATC como radares A a F. Estos radares efectúan la vigilancia aeroportuaria para el control de aproximación terminal y normalmente actúan sobre un sector completo de 360° en horario continuo. Los radares A, C, E y F suelen estar situados en los aeropuertos y todo aeropuerto importante está generalmente equipado con uno más sistemas de radar similar. Los radares A, B y F son los de la generación actual. Los radares C y E son representativos de la siguiente generación, aunque muchos han sido instalados y son representativos de alguna tecnología usada actualmente y deben complementar y/o sustituir a los radares A, B y, a la larga, F después del año 2010. El radar D es un sistema transportable utilizado para el ATC en aeropuertos en los que no hay este tipo de facilidades. Sin embargo, todavía existe un número importante de este tipo de radares de magnetrón no coherentes en sitios fijos alrededor del mundo y funcionan en general con potencias de cresta de 1 MW aproximadamente. Cuando se utiliza, el radar D funciona 24 h al día. Algunos de estos radares funcionan en un modo de diversidad de frecuencias que exige dos y, en algunos casos cuatro, asignaciones de frecuencia por radar.

Anexo 2

Resultados de pruebas con radares de radionavegación aeronáutica

1 Introducción

Este Anexo describe los resultados de pruebas de radares de radionavegación aeronáutica efectuadas por dos administraciones y se llega a la conclusión de que un criterio de protección de I/N de -10 dB protegerá totalmente los tipos de radar que funcionan en la banda 2700-2900 MHz. Los resultados de las pruebas de una administración se basan en mediciones de un radar de radionavegación aeronáutica con efecto Doppler de impulsos que tiene características técnicas similares a las del radar B del Cuadro 1 del Anexo 1. Las pruebas de la otra administración se basan en mediciones de radares que funcionan con características similares a las de los radares D y E del Cuadro 1 del Anexo 1.

2 Pruebas del radar B

Se realizaron pruebas para determinar los efectos que tendrían las emisiones de sistemas de radiocomunicaciones digitales en un radar de radionavegación aérea (identificado como radar B en el Cuadro 1 del Anexo 1) que funciona con la atribución primaria para el servicio de radionavegación aeronáutica (SRNA) en la banda 2700-2900 MHz. Los resultados de estas pruebas se han usado para determinar los criterios de protección I/N que se deben utilizar en los estudios que

evalúan la compatibilidad de radares de radionavegación y sistemas del servicio móvil o OB/ENG en la banda 2700-2900 MHz. Este radar emplea las técnicas de reducción de interferencia/los métodos de procesamiento identificados en la Recomendación UIT-R M.1372, que le permiten funcionar en presencia de otros radares de radionavegación, radiolocalización y meteorológicos. Como se muestra en el Informe UIT-R M.2032, estas técnicas son muy efectivas para reducir o eliminar la interferencia de impulsos entre radares.

Estas pruebas investigaron la efectividad de los circuitos/programas informáticos de supresión de interferencia del radar para reducir o eliminar la interferencia debida a la emisión procedente de un sistema de comunicación que emplea un esquema de modulación digital.

2.1 Objetivos de prueba del radar B

Los objetivos de la prueba para el radar B eran:

- Cuantificar la capacidad del procesamiento de rechazo de interferencia del radar B para mitigar emisiones no deseadas de sistemas de radiocomunicación digital en función de su nivel de potencia.
- Elaborar criterios de protección I/N para emisiones no deseadas de sistemas de radiocomunicación digital recibidas por el radar de radionavegación.
- Observar y cuantificar la efectividad de las técnicas de rechazo de interferencia del radar de radionavegación para reducir el número de falsos objetivos, arrastres radiales (impulsos estroboscópicos) y ruido de fondo.
- Observar y cuantificar la efectividad de las técnicas de rechazo de la interferencia en los radares de navegación para reducir las pérdidas de blancos deseados.

2.2 Características operaciones y técnicas del radar B

Las administraciones utilizan el radar B para supervisar el tráfico aéreo en las proximidades de los aeropuertos dentro de una distancia de 60 millas náuticas (aproximadamente 111 km). Los valores normales para los principales parámetros de este radar se obtuvieron de los documentos de aprobación reglamentaria, folletos de ventas y manuales técnicos y se presentan en el Cuadro 1 del Anexo 1.

El radar divide su distancia operacional de 60 millas náuticas en intervalos de 1/16 millas náuticas (aproximadamente 116 m) y el acimut en 256 intervalos de aproximadamente 1,4° para un total de 249088 células de distancia-acimut. En cada intervalo de acimut de 1,4°, el transmisor envía diez impulsos en una FRI constante y después envía ocho impulsos en otra FRI más baja. El receptor procesa cada conjunto de 18 impulsos para formar 18 filtros Doppler. La alternación de FRI dentro de cada 1,4° ayuda a eliminar velocidades ciegas, desenmascara objetivos en movimiento ocultados por la meteorología y elimina retornos de agrupaciones de segundos y divide la salida del radar en aproximadamente 4483584 células Doppler de distancia-acimut.

2.3 Características de procesamiento de señales del radar B

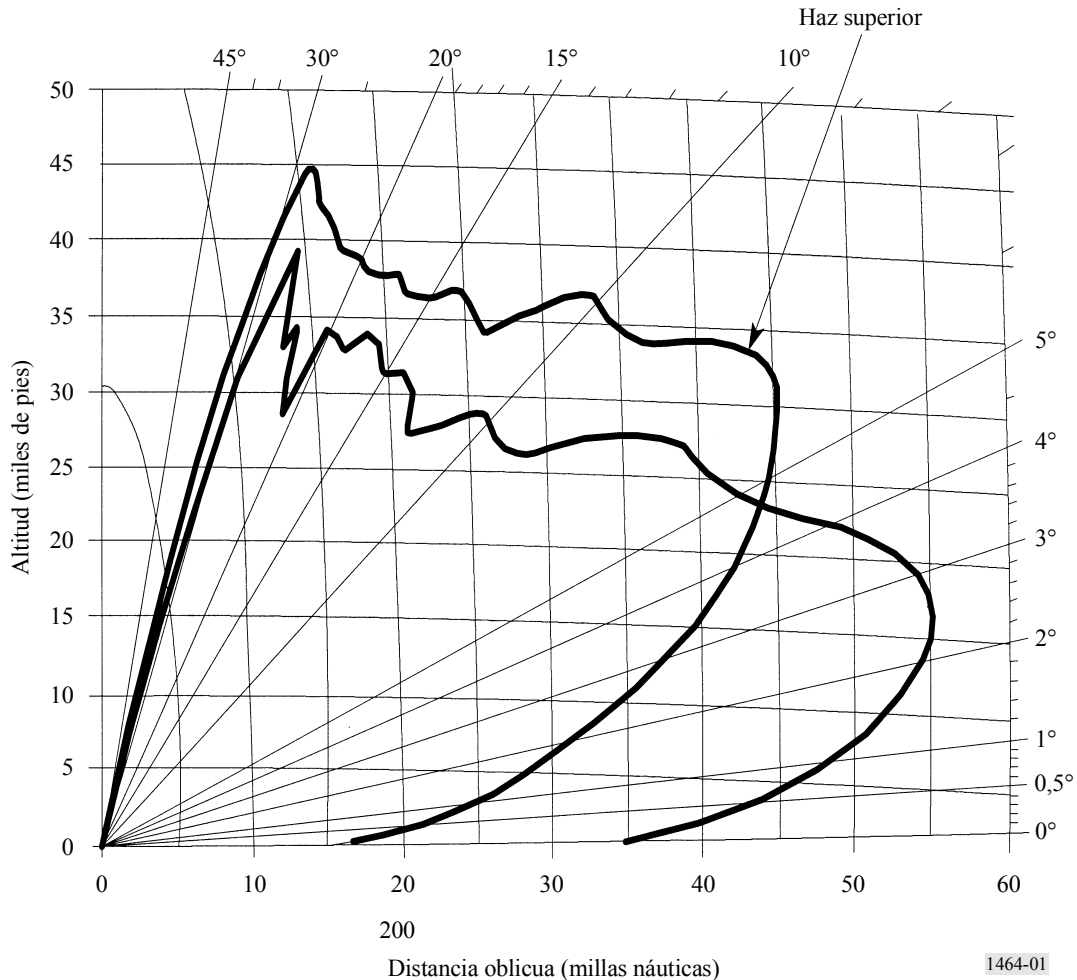
2.3.1 Antena

El radar B empleo bocinas de haces altos y bajos en el sistema de antenas con alimentador. Los impulsos reflejados son recibidos por las bocinas de haces altos y bajos en el sistema de antenas y son conmutados, atenuados y amplificados por componentes de microondas y enviados a sus receptores respectivos. La bocina de haz alto recibe señales devueltas de objetivos de elevada altitud próximos a la antena, mientras que la bocina de haces bajos recibe señales devueltas de objetivos a baja altitud a distancias mayores. El trayecto del haz alto reduce la intensidad de

agrupaciones en distancias cortas para mejorar la visibilidad de subagrupaciones. Para estas pruebas, se seleccionó el receptor de haz bajo, porque el radar recibiría más probablemente interferencia de emisores locales basados en el suelo a través de este trayecto. El haz bajo se usa para la observación de objetivos a distancias que rebasan unos 15-20 millas náuticas (aproximadamente 28-37 km). Los haces no se usan simultáneamente; el receptor del radar bascula entre ellos. En la Fig. 1 se muestran los diagramas de cobertura para los haces altos y bajos para una sección transversal de objetivo de 1 m^2 con una probabilidad de detección igual a 0,80.

FIGURA 1

Diagramas de cobertura de haces altos y bajos



2.3.2 Receptor de blancos del radar B

El receptor/procesador de blancos del radar B emplea STC y detección de blancos en movimiento, que incluye filtrado Doppler y procesamiento CFAR, para detectar y separar las señales devueltas de blancos del ruido, agrupaciones en el suelo y meteorología. El receptor/procesador de blancos clasifica las señales devueltas de blancos de acuerdo con la distancia, detecta su desplazamiento Doppler y las envía al posprocesador del sistema del radar.

2.3.2.1 Circuito de FI del radar B

El receptor FI amplifica la salida del receptor RF y detecta sus desplazamientos de fase. El circuito de FI consta de un detector/amplificador vídeo logarítmico de tres etapas con una amplia gama dinámica y un detector de fase I y Q. La salida del receptor del amplificador FI está en 31,07 MHz. Se aplicó una señal de onda continua barrida en frecuencia como estímulo a la entrada al receptor del radar para obtener el ancho de banda de 3 dB del receptor, que según se midió era de

aproximadamente 680 kHz en la entrada a los detectores de fase. La respuesta del receptor a la señal de onda continua barrida se muestra en la Fig. 2. La gama dinámica del receptor del radar se midió variando el nivel de potencia de una señal de onda continua de frecuencia fija y supervisando la salida del circuito FI en el mismo punto de prueba. La Fig. 3 muestra las características de ganancia del receptor del radar. El punto de compresión se produce con una señal de entrada que tiene un nivel de potencia de unos -43 dBm.

FIGURA 2
Curva de selectividad en FI del radar B

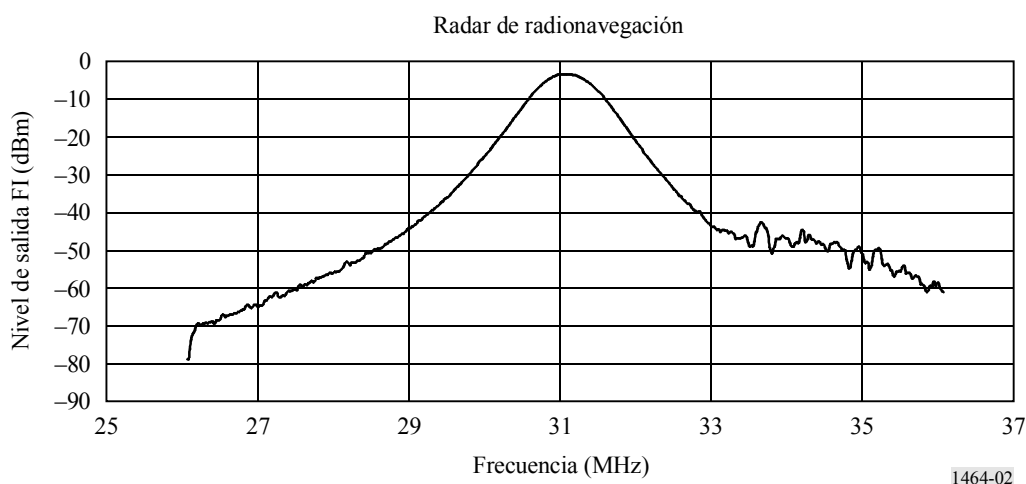
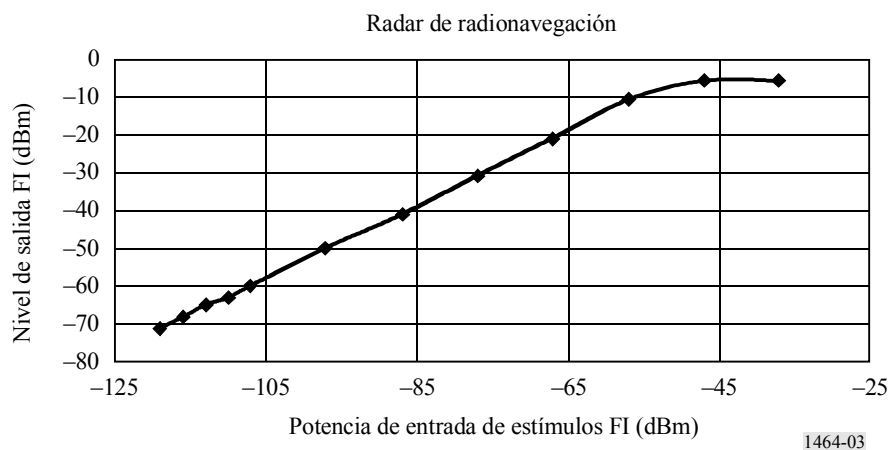


FIGURA 3
Curva de ganancia entrada/salida del radar B



Los detectores de fase a la salida del amplificador FI determinan el cambio de fase entre las señales devueltas y los impulsos transmitidos que las produjeron, utilizando el oscilador coherente del generador de frecuencias como una referencia de fase de impulsos de transmisión. Cada detector de fase tiene respuestas sinusoidales, y producen salidas en fase, I, y en cuadratura, Q, con una relación de fase en seno-coseno (90°) entre sí. Como las respuestas de los detectores de fase I y Q son funciones de seno y coseno, sus salidas pueden ser añadidas vectorialmente para determinar la magnitud real de las señales devueltas de blancos. Los servo bucles realizados por programa informático fijan los desplazamientos de corriente continua, el equilibrio de ganancia y el equilibrio de fase de las salidas I y Q de los detectores de fase. Fijan también el nivel de control automático de ganancia de los amplificadores RF y FI para limitar el nivel de ruido dentro de un cuanto (el cambio del nivel RF representado por la salida del bit menos significativo del convertidor analógico/digital (A/D) del propio ruido).

Las salidas I y Q del circuito FI son muestreadas y digitalizadas por convertidores A/D durante cada 0,77 μ s (igual al 0,75% del ancho del impulso de transmisión), abarcando una célula de distancia de 1/16 millas náuticas (aproximadamente 116 m), a una velocidad de reloj de 2,6 MHz. Los resultados son entrelazados después. La salida del convertidor A/D es palabras digitales de 12 bits que representan las muestras de las señales I y Q al filtro y al procesador de magnitud.

2.3.2.2 Filtrado Doppler

En cada célula de distancia de 1/16 millas náuticas, se forman intervalos de procesamiento coherentes, formados por señales devueltas de 10 y 8 intervalos de repetición de impulsos sucesivos. En el caso de 10 impulsos, los lotes asociados con cada incremento de distancia sucesivo de 1/16 millas náuticas son aplicados secuencialmente al mismo conjunto de 10 filtros Doppler. La memoria viva almacena representaciones digitales de las señales devueltas durante varios trenes de repetición de impulsos y los filtros Doppler las procesan juntas, de modo que se puede calcular los cambios de impulso a impulso de amplitudes de señales devueltas del blanco (que representan frecuencias Doppler aparentes). Para el intervalo de procesamiento coherente de 10 impulsos, se usan cinco de los filtros para detectar blancos en movimiento hacia la antena del radar y los otros cinco se usan para detectar blancos que se alejan. Se usa un proceso similar para el intervalo de procesamiento coherente de ocho impulsos, salvo que se emplean ocho filtros. Los filtros Doppler mejoran la relación S/N del receptor porque estos filtros añaden o integran una serie de señales devueltas de blancos en su frecuencia. Esto hace que las señales devueltas se acumulen progresivamente en la salida del filtro, mientras que el ruido de frecuencia aleatorio se acumula en las salidas del filtro a una velocidad mucho más baja.

2.3.2.3 Proceso de CFAR

El radar B utiliza una técnica CFAR de promediación de ventana deslizante de 27 células (o promediación de distancia) para calcular el umbral de nivel medio (MLT, *mean level threshold*). El procesamiento CFAR varía automáticamente un umbral de detección para mantener declaraciones de falsos blancos, en base a la señal devuelta más las salidas de ruido de los filtros Doppler a una velocidad constante. Cada filtro Doppler suma la energía contenida en el tren de señales devueltas recibidas como barridos de antena sobre un blanco. La energía se combina con la energía de ruido que se acumula en el filtro durante el mismo intervalo de tiempo. Si la señal + ruido integrados en la salida de un filtro excede del MLT, el detector concluye que un blanco está presente.

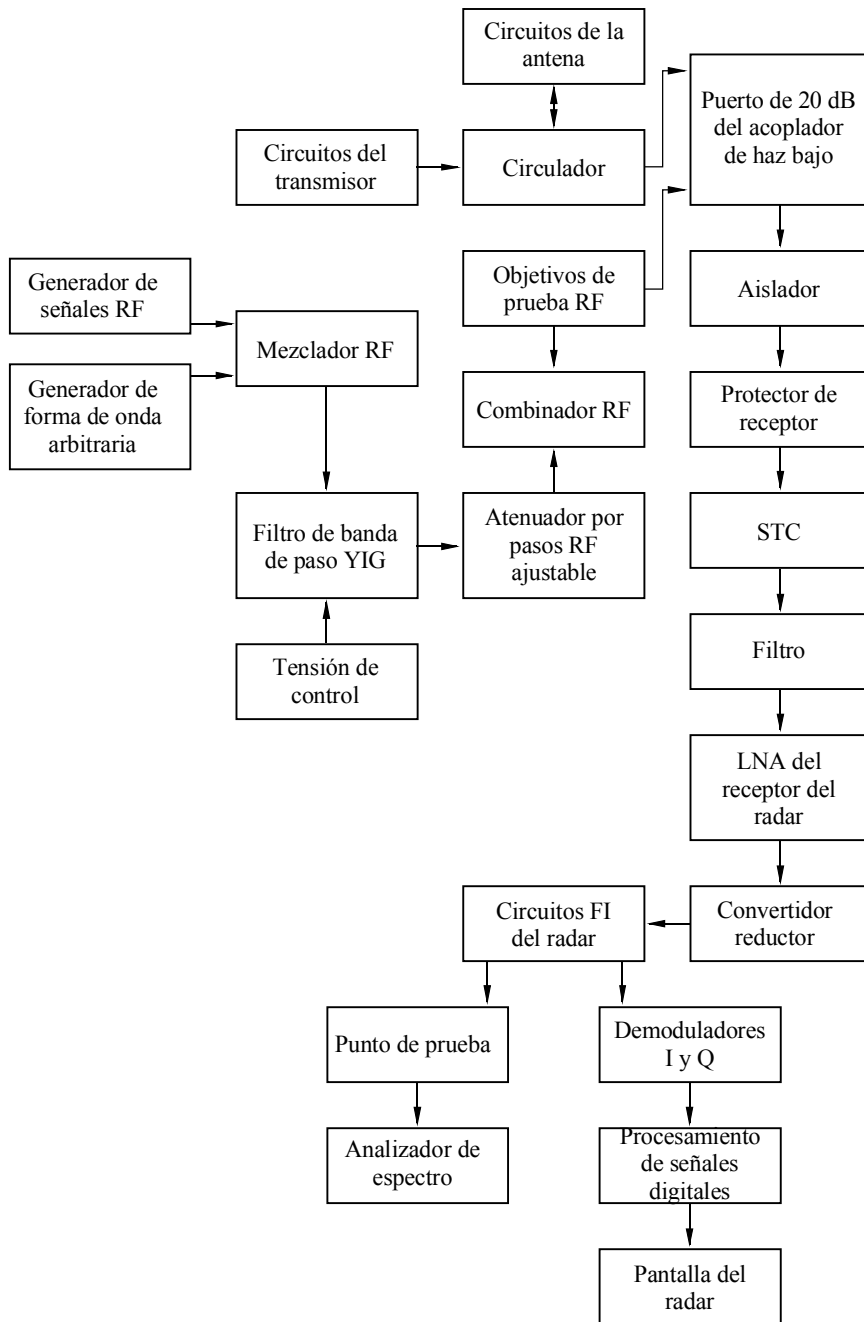
Se establecen umbrales para células de resolución de velocidad no cero sumando las salidas detectadas de las señales en el mismo filtro de velocidad en una ventana de 27 células centrada alrededor de la célula de interés. De este modo, cada salida de filtro es promediada para establecer el nivel medio de la agrupación de velocidad no cero. Los umbrales de los filtros se determinan multiplicando los niveles medios por una constante apropiada para obtener la probabilidad de falsas alarmas deseada.

El ruido aleatorio excederá ocasionalmente del MLT y el detector indicará falsamente que un blanco está presente. Mientras más alto es el umbral de detección del nivel medio de la energía de ruido, más baja será la probabilidad de una falsa alarma, y viceversa. Si el umbral de detección es demasiado alto, blancos válidos pueden no ser detectados. Las salidas de los filtros Doppler son supervisadas continuamente para mantener una fijación de umbral óptima. CFAR fija los umbrales de detección para mantener la tasa de falsas alarmas para cada filtro Doppler en un valor óptimo. Una forma de onda de tipo MDP-4 que abarca la banda del receptor del radar aparecerá simultáneamente en todos los filtros Doppler como ruido y hará que CFAR eleve el nivel de umbral, haciendo que todos los blancos tengan una probabilidad de detección correspondientemente más baja.

2.4 Señales no deseadas

Se introdujeron tres tipos de señales en el radar como emisiones no deseadas por un puerto acoplado de 20 dB en el trayecto de guiondas del receptor (véase la Fig. 4). Las señales eran una onda continua no modulada, una forma de onda con MDP-4 de 2 Mbit/s y una forma de onda MDP-4 de 2 Mbit/s con un factor de ciclo de trabajo de intervalos de tiempo de 1/8. Las tres señales fueron sintonizadas con la frecuencia de trabajo del radar y se produjeron dentro de los 360° de la rotación de la antena.

FIGURA 4
Montaje de prueba con el generador de señales MDP-4



Las formas de onda MDP-4 de impulsos continuas representan el tipo de señal que se prevé sean usadas por los sistemas de radiocomunicaciones digitales.

La señal MDP-4 fue generada e introducida en el receptor de radar de radionavegación utilizando el montaje de prueba mostrado en la Fig. 4.

Se simuló la señal onda continua utilizando un generador de señales RF. Para la forma de onda MDP-4 de tipo de acceso múltiple por división de código (AMDC (en inglés: CMDA)) se programó un generador de forma de onda arbitraria para producir una forma de onda MDP-4 a una velocidad de datos de 2 Mbit/s. Para la forma de onda MDP-4 de tipo de acceso múltiple por división en el tiempo (AMDT), se usó otro generador de onda arbitraria para impulsar la forma de onda MDP-4 para un factor de trabajo de 1/8 intervalos de tiempo. La puntualidad del impulso fue de 577 μ s y el periodo fue de 4,6 ms.

La salida del generador de onda arbitraria se introdujo en un mezclador cuya otra entrada fue conectada a un generador de señales RF, que funcionó como un oscilador local y su frecuencia fue ajustada de modo que la portadora de la forma de onda MDP-4 fue co-sintonizada con el receptor del radar. El filtro de banda de paso YIG (*Yttrium-iron-garnet*) se utilizó para suprimir las emisiones no deseadas que resultaron del proceso de mezcla. El atenuador por pasos inmediatamente después del filtro YIG se usó para controlar el nivel de potencia de las emisiones MDP-4.

2.5 Generación y cómputo de blancos

Se generaron diez blancos simulados igualmente espaciados a lo largo de un radio utilizando el soporte físico/soporte lógico generador de blancos de prueba incorporados en el radar. Los blancos en el radio tenían una envolvente de potencia constante. El cómputo de los blancos se hizo con 20 rotaciones del radar. En 20 rotaciones, se generaron 200 blancos. Si se contaron 200 blancos, la probabilidad de detección, P_d , fue 100%, y si se contaron 180 blancos, la P_d fue 0,90 y así sucesivamente. Por tanto, la P_d se calculó dividiendo el número de blancos contados por el número de blancos previstos (o generados). Se contaron los blancos manualmente observando la salida vídeo correlacionada en la ppi del radar.

2.6 Condiciones de prueba

Las pruebas se efectuaron con los siguientes parámetros fijados en el radar de radionavegación aeronáutica, que se muestran en el Cuadro 4.

CUADRO 4

Fijaciones de control del radar

Parámetro	Fijación
STC	Desactivado
Rechazo de interferencia (IR)	Activado
Control automático de ganancia	Activado
Imagen seleccionada	Vídeo procesado
Distancia	60 millas náuticas (aproximadamente 111 km)
P_d de blancos básica deseada	0,90 (controlada por programa)

Aunque se habilitó el control automático de ganancia, las señales interferentes no tuvieron un nivel de potencia suficientemente alto para afectar sus operaciones.

La especificación de la calidad del fabricante del radar B es una P_d de blancos del 80% para un blanco de sección transversal de 1 m^2 a 55 millas náuticas con una probabilidad de falsa alarma, P_{fa} , de 1×10^{-6} . La P_d de blancos básica deseada de 0,90 elegida para las pruebas representa un nivel de calidad que los radares con funcionamiento en la banda 2700-2900 MHz lograrán en un próximo futuro, cuando las ganancias adicionales de procesamiento les permitan detectar blancos al nivel mínimo de ruido del receptor de radar o por debajo de él.

2.7 Procedimientos de prueba

Se ajustó la salida de potencia RF del sistema generador de blancos de modo que la P_d de blancos estuviese lo más próxima posible a la P_d básica del 90% (dado que los niveles de blancos sólo podían ser ajustados en incrementos de 1 dB) sin interferencia presente (para blancos vídeo correlacionados). Se contaron los blancos en veinte exploraciones para fijar la P_d básica. Debido al procesamiento CFAR, el radar realizó 8-10 exploraciones antes de alcanzar un estado estable después que se ajustó la potencia del blanco.

Después que se fijó el radar a su condición de línea de base, se introdujeron señales CW y MDP-4 en el receptor del radar. La potencia de las señales de onda continua y MDP-4 interferentes en el receptor del radar fueron fijadas a niveles diferentes, mientras que el nivel de potencia de los blancos se mantuvo constante. Los niveles de potencia de las señales de onda continua y MDP-4 se fijaron a valores que produjeron niveles de I/N de -12 , -10 , -9 , -6 , -3 , 0 , $+3$ y $+6$ dB en el circuito FI del receptor del radar. Para tener en cuenta el procesamiento CFAR del radar, no se contaron los blancos hasta que se produjeron diez exploraciones después que la interferencia había sido habilitada. Después de 20 exploraciones con la interferencia habilitada y los blancos contados, se inhabilitó la interferencia y se permitieron diez exploraciones adicionales antes de probar el siguiente nivel de I/N . El hecho de esperar que se produjeran diez exploraciones aseguró que la medición presente no era afectada por la anterior.

A medida que se variaban los niveles de potencia de onda continua y MDP-4, se observó en la pantalla del radar un aumento del número de falsos blancos, arrastres radiales y un aumento de «manchitas» de fondo.

2.8 Resultados de las pruebas

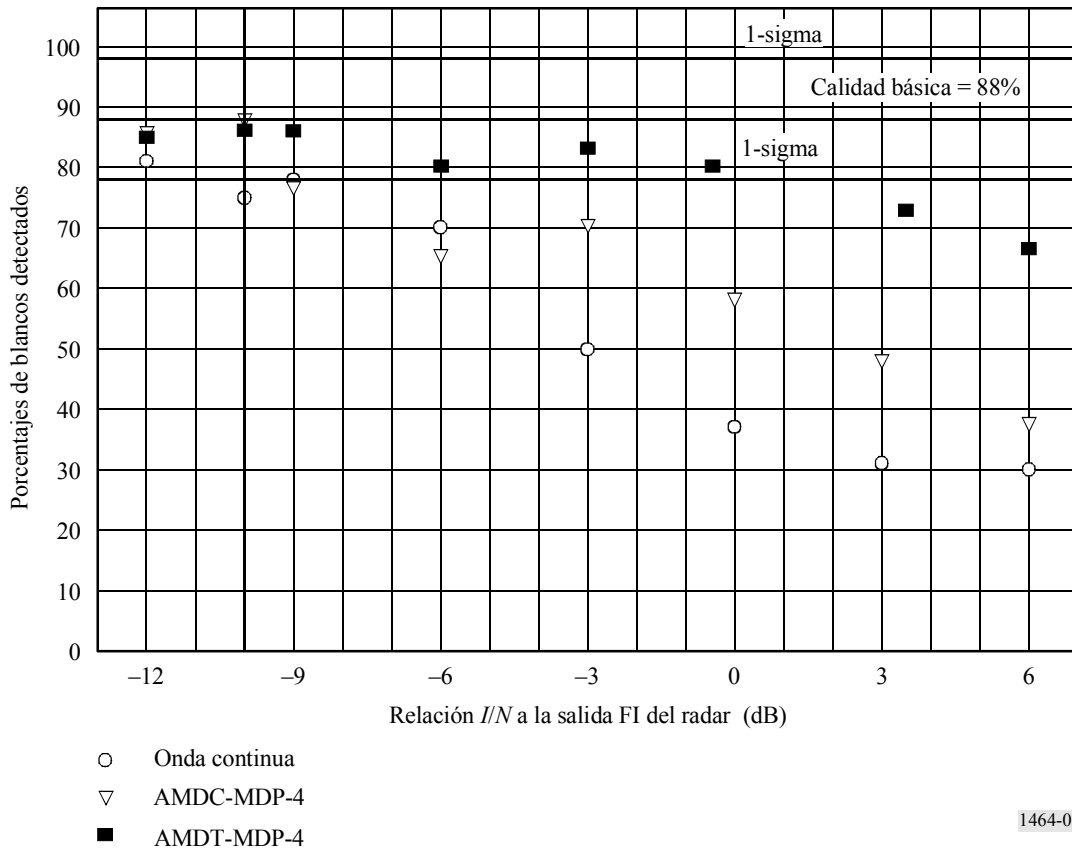
Se produjeron las curvas que muestran la P_d de blancos en función de los niveles de I/N para las emisiones no deseadas de onda continua, AMDC-MDP-4 y AMDT-MDP-4. Los resultados se muestran en la Fig. 5.

Para las pruebas del nivel básico (sin introducir en el radar interferencia) el radar tiene un valor medio de observación de 8,8 blancos por rotación, de los 10 blancos que se introducen por rotación. Se observaron en cada ensayo 20 rotaciones. La P_d de blancos básica real fue entonces de $175/200$, o el 88%. Aunque para estas pruebas se especificaban 9 de cada 10 blancos por rotación como valor deseado de la P_d de blancos básica, la capacidad de controlar la potencia de salida de RF del generador de blancos estaba limitada en pasos de 1 dB, lo que hacía extremadamente difícil obtener un valor exacto de la P_d de 0,90. Con el valor de potencia del blanco que se utilizó en las pruebas, un aumento de 1 dB en la potencia del blanco se traducía en una P_d superior a 0,95 y una disminución de 1 dB de la potencia del blanco daba lugar a una P_d aproximadamente igual a 0,75.

La varianza de todo cómputo de blancos básico era de 1,1 blancos por rotación. El valor 1-sigma es igual a la raíz cuadrada de la varianza, o 1,05. Esta amplitud del error admisible respecto a la P_d básica es el valor medio de blancos menos el valor 1-sigma, dividido por 10. Este valor es $(8,8 - 1,05)/10$ o $\pm 10\%$. La Fig. 5 muestra la P_d básica del 88% y también ilustra los límites superior e inferior del error admisible de la P_d sobre la base de los valores 1-sigma. El límite superior es una P_d del 98% y el límite inferior una P_d del 78%. El nivel aceptable de la relación I/N introduciendo la interferencia en el radar es el valor de la I/N en el que la interferencia no hace que la P_d caiga por debajo del límite inferior de 78%. Para una P_d superior, el valor 1-sigma sería inferior, lo que haría más estricta la protección en términos de la I/N .

La Fig. 5 muestra los umbrales de la I/N para cada tipo de señal de interferencia, cuando la P_d de blancos cae por debajo del umbral 1-sigma. Para tipos de señal de interferencia de onda continua y AMDC-MDP-4, esto se produce en valores de la I/N superiores a -10 dB. Para la señal de interferencia de tipo AMDT-MDP-4, la P_d no cayó por debajo de la línea 1-sigma hasta que la I/N fue superior a 0 dB.

FIGURA 5
Curvas de probabilidad de detección de blancos



1464-05

3 Pruebas de los radares D y E

Una administración realizó mediciones con radares D y E que utilizan ruido blanco de banda estrecha y señales múltiplex con división en frecuencia ortogonal como fuentes de interferencia para determinar los efectos sobre la P_d de blancos de los radares. Se usaron aeronaves como blancos de oportunidad.

Además de la P_d , la tasa de falsas alarmas, P_{fa} , y la precisión son parámetros importantes de funcionamiento de los radares, que pueden ser afectados por interferencia adicional, aunque la tasa

de falsas alarmas teóricamente debe ser constante, pues el procesador de vídeo utiliza un algoritmo de CFAR para ajustar el umbral de detección. En estas pruebas, sólo se presentan los resultados de la P_d .

Las siguientes Figuras muestran el efecto de la interferencia de señales DVB-T sobre la probabilidad de detección en un radar para todas las aeronaves en el volumen:

- 40-60 millas náuticas (aproximadamente 74-111 km) (60 millas náuticas es la distancia de detección máxima del radar); y
- por encima del nivel de vuelo 250 (25 000 pies o aproximadamente 7 620 m sobre el nivel del mar).

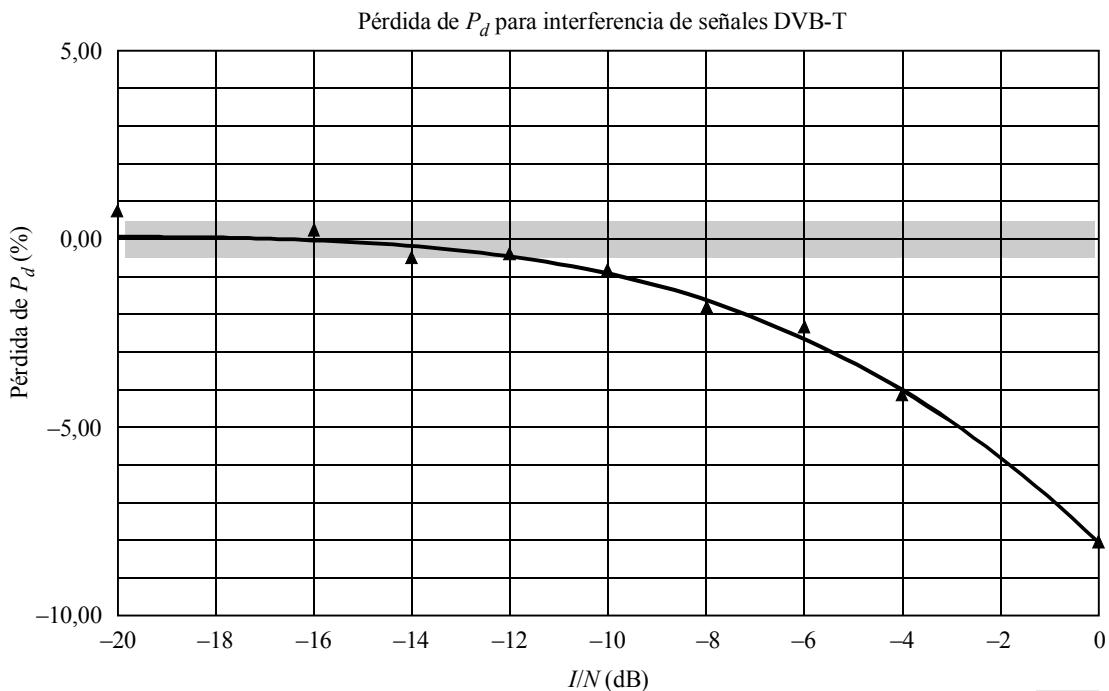
Debe mencionarse que aunque éste es un escenario donde la pérdida de calidad de funcionamiento es naturalmente más grave que para la vecindad del radar, hay otras circunstancias en las que los efectos serían aún peores:

- sólo las aeronaves pequeñas (aviones de propulsión de la aviación general o militares) en vez de todas las aeronaves;
- niveles de vuelo bajos (especialmente largas distancias)
- enfoque sólo en la distancia máxima (por ejemplo, 50-60 millas náuticas, o aproximadamente 92-111 km).

Se ha elegido el ejemplo anterior porque proporciona muestras suficientes para un análisis estadístico estable. El valor de referencia, para el cual la pérdida de P_d es 0%, es la P_d promedio de siete mediciones sin ninguna señal de interferencia. Estos valores tienen una desviación típica de 0,5% que se compone de errores de medición y la repercusión de fluctuaciones en el conjunto de datos de tráfico, y se indica mediante la barra horizontal sombreada en los siguientes diagramas.

FIGURA 6

Nivel de interferencia, I/N , en función de la pérdida de P_d para aeronaves por encima de nivel de vuelo 250 y más de 40 millas náuticas para un radar de vigilancia de aeropuerto (ASR) Salzburg



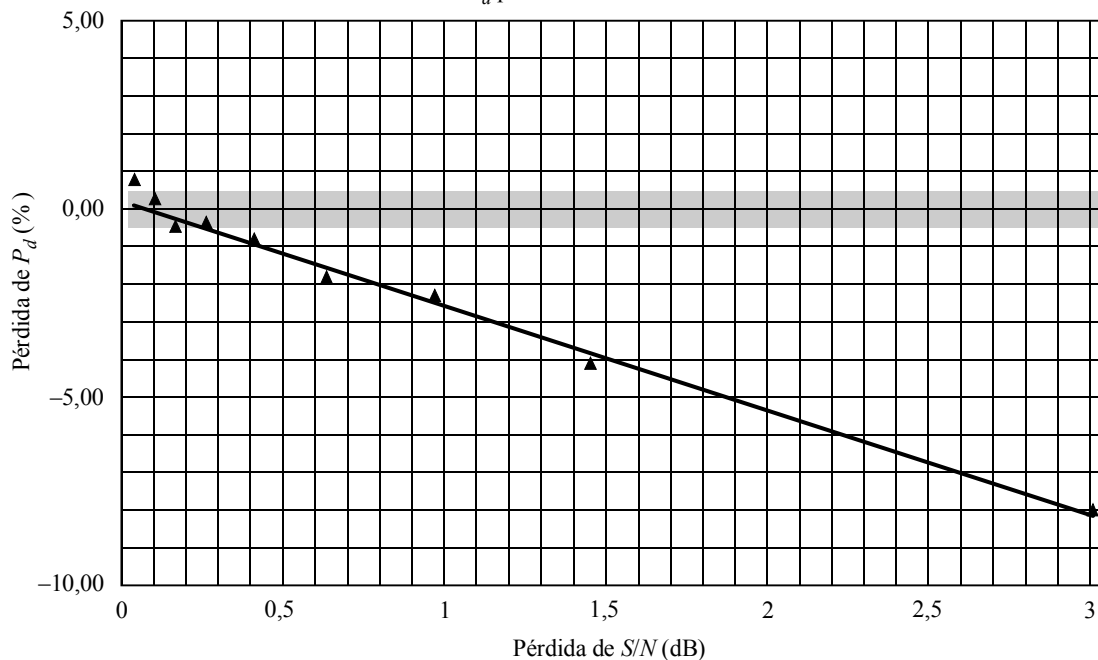
En una $I/N = -6$ dB hay ya una pérdida de aproximadamente 2,5% de detección de probabilidad y en -10 dB, es 0,8%, que está aún fuera del margen de error. La curva de interpolación muestra que la caída de P_d comienza alrededor de -14 dB y se hace importante por encima de -10 dB. La Fig. 7 muestra los mismos datos, pero en función de $\Delta S/N$ en vez de I/N . La sensibilidad de la P_d a pérdida de S/N es aproximadamente 3%/dB entre 1% y 7% de pérdida de P_d .

Los resultados de las mediciones en el otro radar son general las mismas, con la excepción de que la P_d absoluta del sistema de radar más antiguo (especialmente cuando sólo se usa P_d una frecuencia de canal) es generalmente más baja que el valor del sistema moderno con su procesamiento de datos diferente.

FIGURA 7

Pérdida de $\Delta S/N$ en función de la pérdida de P_d para aeronaves por encima del nivel de vuelo 250 y más allá de 40 millas náuticas

Pérdida de P_d para interferencia de señales DVB-T



1464-07

4 Conclusiones

Los resultados de las pruebas indicados en este Anexo muestran que la capacidad de los radares B, D y E para detectar objetivos es afectada en un nivel de I/N de -6 dB. Para proteger completamente los tipos de radares B, D y E, y otros radares de radionavegación aeronáutica que funcionan en la banda 2 700-2 900 MHz contra las emisiones de sistemas de radiocomunicaciones que usan esquemas de modulación digital, el criterio de protección de I/N debe ser -10 dB. Este valor representa el umbral de la interferencia combinada cuando están presentes múltiples fuentes de interferencia. Los requisitos futuros de los radares que funcionan en la banda 2 700-2 900 MHz para detectar y seguir blancos con sección transversal inferior pueden dar lugar a criterios de protección más estrictos.

Anexo 3

Resultados de pruebas con un radar meteorológico

1 Resumen

El objetivo clave del trabajo contenido en este Anexo fue establecer el nivel máximo de interferencia que los sistemas de radares meteorológicos pueden soportar antes de que su capacidad de previsión sea comprometida.

Sobre la base de las especificaciones técnicas del radar, se han elaborado modelos matemáticos para productos clave (reflectividad básica, velocidad radial media y anchura de espectro) que indican cuáles deben ser estos niveles previstos. Para validar físicamente este análisis, se ha definido una metodología de prueba y de análisis de datos a través de la cual se recopilaron y analizaron los datos.

El análisis de los datos respalda el valor calculado requerido para la protección de las mediciones de la reflectividad. Las limitaciones actuales del proceso de calibración del radar y supresión de ruido realizado por el procesador de datos de bajo nivel limita la medición de los criterios de protección necesarios para las mediciones de la anchura de banda de espectro. No obstante, la corrección de los datos para las limitaciones de este procesamiento resulta en valores que confirman los valores de protección calculados.

1.1 Introducción

Las pruebas se efectuaron en un radar meteorológico moderno (indicado como radar G en el Anexo 1, Cuadro 2) para determinar los criterios apropiados necesarios para la protección contra señales de onda continua y señales de interferencia en la banda 2 700-2 900 MHz. Las pruebas consistieron en inyectar una señal de onda continua y seis esquemas de modulación digital diferentes en el receptor del radar mientras exploraba la atmósfera. Se registraron los productos meteorológicos básicos o de bajo nivel (reflectividad básica, velocidad radial media y anchura de espectro) mientras se realizaba una serie de rotaciones de antena en una sola elevación de antena. Se inyectaron señales de interferencia con relaciones I/N de +6 a -15 dB.

2 Cálculo teórico de criterios de protección necesarios

El radar genera tres productos básicos que son usados por el sistema de procesamiento de señales para obtener los productos meteorológicos utilizados por los meteorólogos, y que son:

- reflectividad de volumen, Z (mm^6/m^3) que para la lluvia es una medida de agua total en el volumen de muestras del radar;
- velocidad radial media, V (m/s), que es el movimiento radial medio ponderado de potencia de los objetivos en el volumen de muestras;
- anchura de espectro, W (m/s), que es una medida de la dispersión de la velocidad radial de los objetos en el volumen de muestras.

2.1 Nivel de señal mínimo

El procesamiento de señales suprime los efectos de ruido del sistema de radar de los productos de reflectividad y anchura de espectro, de modo que el sistema puede proporcionar estos productos cuando el nivel de señal está por debajo del nivel de ruido del receptor. El umbral S/N , es decir, el nivel más bajo para el cual la señal de retorno (hacia atrás) es procesada, es seleccionable por el

operador del radar entre los límites de la S/N de -12 dB y $+6$ dB. Con el actual procesamiento de señales, los valores más bajos generalmente no se usan, debido a limitaciones con la supresión de ruido, pero el sistema proporciona productos útiles hasta una S/N de -3 dB. El nivel de interferencia que compromete el sistema se relaciona con el nivel de señal mínimo de S/N de -3 dB y las propias características del producto, como se describe a continuación. El exceso de interferencia afectará la calidad de los datos, degradará los productos meteorológicos y comprometerá la capacidad del sistema para realizar su misión de proporcionar los datos necesarios destinados a la previsión meteorológica para el público, los avisos meteorológicos importantes y la medición de la intensidad de lluvia para la predicción de las inundaciones y gestión de las aguas.

2.2 Reflectividad

La reflectividad se usa en múltiples aplicaciones, de las cuales la más importante es la estimación de la intensidad de lluvia. La reflectividad se calcula a partir de un promedio lineal de potencia de retorno y está sujeta a contaminación por interferencia como un aumento desconocido en la reflectividad medida. La reflectividad es contaminada seriamente si la polarización excede de 1 dB. Una polarización de 1 dB es dos veces la exactitud de calibración del radar y equivale a la desviación típica de la estimación de reflectividad especificada en los requisitos técnicos del radar.

La polarización en términos de la relación interferencia/señal viene dada por:

$$\text{dB bias} = 10 \log \frac{S + I}{S}$$

Y se produce una polarización de 1 dB en:

$$I/S = 0,26$$

$$10 \log I/S = -6 \text{ dB}$$

Por tanto, la reflectividad es polarizada 1 dB en un nivel de interferencia de 6 dB por debajo de la señal.

Como el nivel de señal mínimo tiene una S/N de -3 dB y el nivel I/S máximo para la reflectividad es -6 dB, la I/N máxima es:

$$(-3 \text{ dB}) + (-6 \text{ dB}) = -9 \text{ dB } I/N$$

2.3 Velocidad radial media

La velocidad radial media se calcula a partir del argumento de la covarianza compleja. El argumento de covarianza compleja proporciona una estimación del desplazamiento angular del vector de la señal Doppler de impulso de radar a impulso de radar. El desplazamiento dividido por el intervalo de tiempo entre los impulsos es la velocidad angular del vector Doppler.

Como un ruido de banda nacha, el vector de la señal de interferencia tiene probabilidad uniforme en el plano complejo y por tanto no introduce una rotación sistemática del vector Doppler ni introduce una polarización en la estimación. Sin embargo, la «aleatoricidad» de las señales compuestas más el vector de interferencia debido a la interferencia aumenta la varianza de la estimación de la señal Doppler.

La varianza de frecuencia del efecto Doppler, que retiene todos los términos, salvo los que son inversamente proporcionales al número de muestras cuadradas, puede calcularse como:

$$\text{var}(\hat{f}) = \frac{2\pi^{3/2}WT}{8\pi^2 M \beta^2(T)T^2} + \frac{\left(\frac{N}{S}\right)^2 + 2\left(\frac{N}{S}\right)[1 - \beta(2T)]}{8\pi^2 M \beta^2(T)T^2}$$

donde:

- \hat{f} : estimación de frecuencia (Hz)
- W : desviación típica de espectro de frecuencia (Hz)
= 80 Hz para 4 m/s para marca de N/T en $f_c = 2\,995$ MHz
- T : intervalo de muestreo (s)
= 10^{-3} s para marca de N/T
- M : número de muestras en estimación
- N : potencia de ruido
- S : potencia de señal
- β : correlación de señal en arrastre T
= $\exp(-2\pi^2 W^2 T^2)$ para los espectros gaussianos supuestos.

El primer término es la contribución de la varianza debido a la característica de la señal y el segundo término es la contribución de la varianza debido a ruido.

La varianzas de frecuencia son gravemente comprometidas si la interferencia aumenta la varianza en más del 50%. La incertidumbre en los datos degrada todos los productos basados en la velocidad y las mediciones de velocidad de corte en particular. (La velocidad de corte es una diferencia de velocidad en cierta distancia.) Un aumento de varianza de 50% aumenta el valor de corte detectado fiablemente aproximadamente en un 25% por encima del valor de etapa formativa de eventos meteorológicos.

Una expresión para la I/N resultante en un aumento de varianza del 50% de los parámetros de marca de requisitos técnicos y $S/N = -3$ dB viene dada por:

$$2\pi^{3/2}WT + \left(\frac{N+I}{S}\right)^2 + 2\left(\frac{N+I}{S}\right)[1 - \beta(2T)] = 3/2(2\pi^{3/2}WT) + 3/2\left(\frac{N}{S}\right)^2 + 3/2(2)\left(\frac{N}{S}\right)[1 - \beta(2T)]$$

donde:

- $W = 80$ Hz
- $T = 10^{-3}$ s
- $2\pi^{3/2}WT = 0,89$
- $1 - \beta(2T) = 0,4$
- $S = 0,5 N$

Sustituyendo y resolviendo para I/N da la expresión cuadrática:

$$(I/N)^2 + 2(I/N) - 1,21 = 0$$

$$I/N = 0,49$$

$$10 \log I/N = -3 \text{ dB}$$

Por tanto, la interferencia no puede ser mayor que el valor de señal mínimo.

2.4 Anchura de espectro

La anchura de espectro se calcula a partir de la correlación de arrastre suponiendo una densidad espectral gaussiana. El algoritmo se expresa como:

$$W = \frac{Va}{\pi} \left| \ln \frac{R^2}{S^2} \right|^{1/2}$$

donde:

W : anchura de espectro (desviación típica)

Va : velocidad de Nyquist 25 m/s de los requisitos técnicos del radar

R : potencia de covarianza de arrastre

S : potencia de señal.

La señal de interferencia causa una polarización y un aumento de varianza en la estimación del aumento de espectro, pero la polarización es más perjudicial. La anchura de espectro es un compromiso cuando la polarización inducida por la interferencia excede de la precisión de anchura de los requisitos técnicos en 1 m/s. La I/N en la cual se produce este nivel de polarización puede ser calculada resolviendo la covarianza en 4 m/s y potencia de señal de $N/2$, resolviendo después para el nivel $S + I$ que produce una anchura de espectro de 5 m/s. 4 m/s es el valor básico dado en los requisitos técnicos. Para calcular I/N , se resuelve la ecuación anterior para los casos de 4 m/s y 5 m/s.

Para $W = 4$ m/s:

$$25/\pi \left| \ln (R^2/S^2) \right|^{1/2} = 4$$

$$\ln (R^2/S^2) = -0,25$$

$$R/S = 0,88$$

$$R = 0,88 S$$

$$R = 0,88 (N/2)$$

Para $W = 5$ m/s:

$$25/\pi \left| \ln (R^2 + I)^2 \right|^{1/2} = 5$$

$$\ln R^2/(S + I)^2 = -0,39$$

$$R/(S + I) = 0,82$$

Sustituir : $R = 0,88 (N/2)$, $S = N/2$:

$$0,88 (N/2) / (N/2) + I = 0,82$$

$$0,82 ((N/2) + I) = 0,88 (N/2)$$

$$I/N = 0,0366$$

$$10 \log (I/N) = -14,4 \text{ dB}$$

3 Funcionamiento del sistema, productos de salida y sensibilidad a la interferencia

3.1 Modo de funcionamiento del sistema para prueba

El radar tiene múltiples modos de funcionamiento que utilizan diferentes velocidades de rotación de antena, elevaciones de antena y PRF. El modo de funcionamiento seleccionado para las prueba es uno de los modos usados más corrientemente, y es optimizado para la sensibilidad del sistema, lo que conduce a alta sensibilidad a la interferencia. El Cuadro 5 proporciona las características del modo usado en la prueba.

CUADRO 5

Características del sistema de radar meteorológico usado en la prueba

Características del radar	
Frecuencia	2 995 MHz
Potencia de impulso	750 kW
Anchura de impulso	4,7 μ s
PRF	322 Hz (primer corte) 446 Hz (segundo corte)
Distancia de cobertura máxima	290 millas (app. 467 km)
Anchura de banda RF (en los puntos de 3 dB)	13 MHz
Anchura de banda FI	630 kHz
Factor de ruido del sistema	4,9 dB
Tipo de diagrama de antena	Puntual
Velocidad de exploración de la antena	0,84 rpm
Tiempo de exploración de la antena	71,4 s
Altura de la antena	30 m
Apertura del haz de la antena	0,90°
Polarización	Lineal horizontal

En el modo usado, la rotación de la antena comienza en una elevación de 0,5°, el radar transmite un impulso de 4,7 μ s cada 3,1 ms para la primera rotación, después transmite un impulso cada 2,24 ms para la segunda rotación. Éstos corresponden a una PRF de 322 Hz y 446 Hz, respectivamente. Cada revolución abarcada 360° en acimut. En funcionamiento normal, el radar ejecuta también rotaciones de antena en ángulos de elevación más altos antes de volver a 0,5°. Para esta prueba, los dos cortes de elevación en la única elevación de antena proporcionó suficientes datos para análisis y no se efectuaron los cortes en elevaciones más altas. La primera rotación de la antena se usó para medir la reflectividad y la segunda para medir la velocidad radial media y la anchura de espectro (véase más adelante). Para cada posición en la atmósfera, se transmiten y reciben múltiples impulsos. Debido a la duración de los impulsos de transmisión comparadas con el tiempo entre impulsos, el sistema está en modo recepción más del 99,5% del tiempo. La magnitud de los impulsos recibidos es aproximadamente 200 dB más baja que la de los impulsos transmitidos, porque los impulsos son dispersados por objetos s aeroportados pequeños (del orden de milímetros de diámetro o más pequeños) a distancias de kilómetros del radar. La señal recibida es convertida de 2 995 MHz a la FI de 57 MHz, donde es aplicada después al detector síncrono. Las señales de banda de base I y Q detectadas son digitalizadas a un nivel de 16 bits para uso en los subsistemas de procesamiento.

3.2 Productos de salida

Los productos devueltos desde cada posición son usados por los subsistemas de procesamiento para obtener los tres productos meteorológicos de base, a saber, reflectividad básica, velocidad radial media y anchura de espectro, y son visualizados como productos a los usuarios y utilizados para elaborar otros productos meteorológicos que representan la acumulación de intensidad de lluvia, tornados, vientos, etc. La reflectividad se obtiene de la amplitud (o potencia) de la señal recibida. La velocidad radial media se obtiene de las diferencias en los vectores I y Q causadas por el desplazamiento debido al efecto Doppler. La anchura de espectro es la varianza entre impulsos de las velocidades recibida desde el mismo lugar.

3.3 Sensibilidad a la interferencia

Los productos de base son afectados por la interferencia de dos maneras. Primero, los valores pueden ser polarizados, lo que disminuye la precisión del sistema, y segundo, la varianza de las salidas puede ser afectada. En presencia de interferencia, la reflectividad es sensible a la polarización, la velocidad radial media es sensible a errores de varianza, y la anchura de espectro es afectada por la polarización y los errores de varianza. Para la anchura de espectro, las polarizaciones son más importantes que los errores debidos a la varianza, porque la polarización o desplazamiento representa un error de medición de velocidad, mientras que la varianza representa la incertidumbre de las velocidades medidas. El Cuadro 6 muestra los errores inducidos por la interferencia, polarización y varianza que afectan a los productos de base.

CUADRO 6

**Sensibilidad de productos meteorológicos de base
al error inducido por la interferencia**

Producto de base	Errores inducidos por la interferencias	
	Polarización	Varianza
Reflectividad	X	
Velocidad		X
Anchura de espectro	X	X

El radar fue diseñado con criterios de funcionamiento específicos para lograr el más alto nivel posible de previsión meteorológica. Los requisitos técnicos del radar especifican que la calibración de reflectividad debe ser exacta en mucho menos de 1 dB (en la práctica se logra 0,5 dB). La reflectividad es contaminada seriamente si la polarización en la estimación excede de 1 dB. Una polarización de 1 dB es dos veces la exactitud de calibración del radar y equivale a la desviación típica de la estimación de reflectividad especificada en los requisitos técnicos del radar. La velocidad y la anchura de espectro deben ser exactos en 1 m/s, según lo especificado por los requisitos técnicos. Las mediciones de velocidad son comprometidas seriamente si la interferencia aumenta la varianza estimada por más del 50%. La incertidumbre en los datos degrada los productos basados en la velocidad radial media. Cuando estos niveles son rebasados debido a la interferencia, el uso del sistema de radar como una herramienta de previsión está gravemente comprometido y se ha producido interferencia perjudicial.

De los tres productos de base, la anchura de espectro es el más sensible, porque se obtiene de una función de autocorrelación que es muy sensible al ruido. Los niveles de interferencia que afectan la precisión en más de 1 m/s comprometerán el funcionamiento del sistema. La velocidad radial media y la anchura de espectro se usan conjuntamente para distinguir viento, que tiene una anchura de espectro baja, de tornados y otros fenómenos meteorológicos violentos que tienen altos valores de anchura de espectro. El umbral del radar para interferencia está limitado a la polarización de anchura de espectro de 1 m/s.

4 Método de medición

Las mediciones se realizaron inyectando la señal de interferencia en el receptor del radar, y se usó un acoplador para combinar la interferencia con la señal recibida por el radar. La frecuencia de trabajo del radar probado y la frecuencia de señal de interferencia simulada fue 2 995 MHz.

NOTA 1 – La Recomendación UIT-R M.1464 reconoce que los sistemas de radares meteorológicos pueden funcionar hasta a 3 000 MHz.

Las señales de interferencia usadas en la prueba se muestran en el Cuadro 7.

CUADRO 7

Señales de interferencia

Fuente de señal de interferencia Frecuencia central = 2 995 MHz	
Onda continua	
W-CDMA	4,096 Msímbolos/s
CDMA-2000-3X	3,686 Msímbolos/s
EDGE-MDMG	384 Msímbolos/s
EDGE-MDP-8	384 ksímbolos/s
DECT	1,152 ksímbolos/s

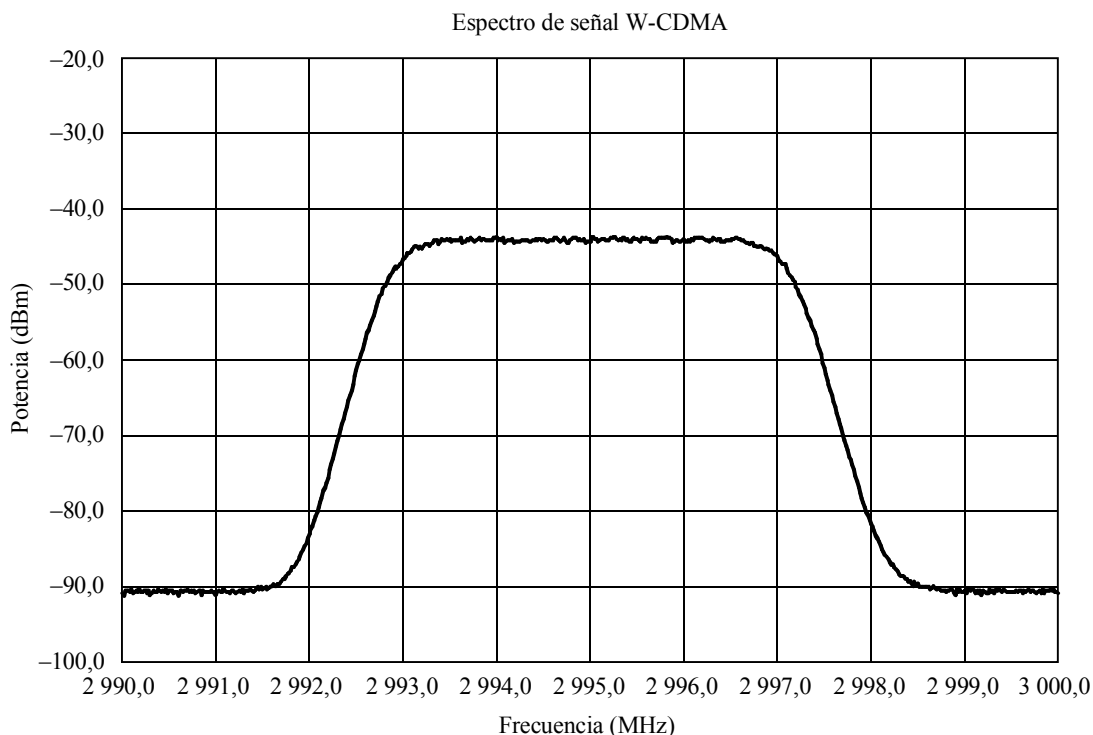
MDMG: modulación por desplazamiento mínimo con filtrado gaussiano

DECT: Telecomunicaciones digitales mejoradas sin cordón

El espectro para señales W-CDMA y CDMA-2000 3X se muestran en las Figs. 8 y 9.

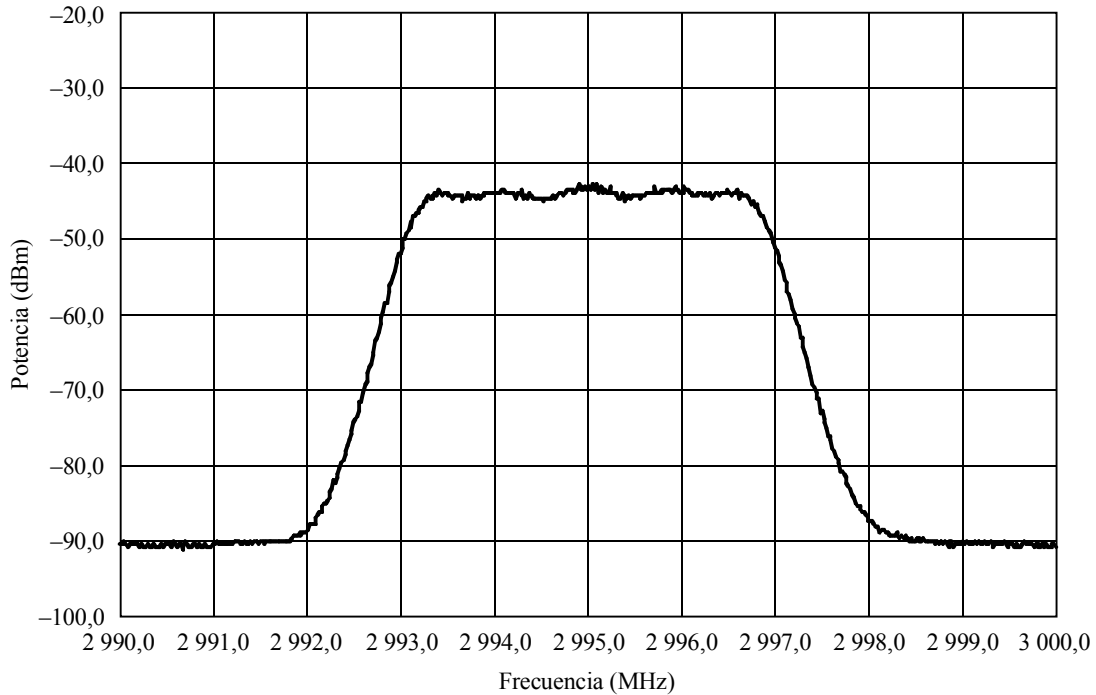
FIGURA 8

Trazo de espectro para la señal W-CDMA



Fijaciones del analizador de espectro:
 Anchura de banda de resolución: 300 kHz
 Tiempo de barrido: 5 s

FIGURA 9
Trazo de espectro para la señal CDMA-2000 3X

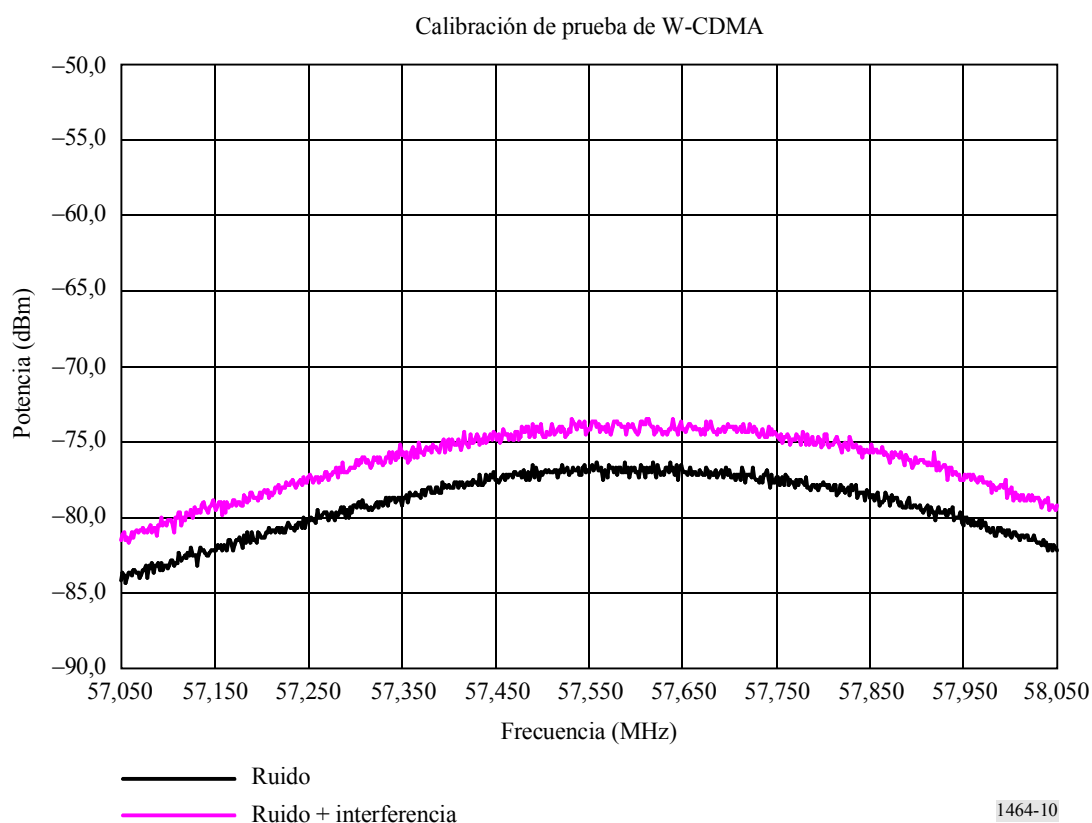


Fijaciones del analizador de espectro:
Anchura de banda de resolución: 300 kHz
Tiempo de barrido: 5 s

1464-09

Para calibrar el montaje de prueba hasta un nivel de interferencia conocido a la entrada del receptor de radar, se midió el umbral de ruido mínimo del receptor, sin interferencia, en la salida FI de 57,55 MHz del receptor. Una vez registrado este umbral en la salida FI, se activó el nivel de la señal de interferencia y se aumentó hasta que el umbral de ruido mínimo a la salida FI del radar aumentó 3 dB. El punto en el cual el ruido aumentó 3 dB correspondió al nivel de interferencia dentro de la banda de paso que era igual al ruido del receptor del radar dentro de la banda de paso, y una relación I/N de 0 dB. Se registró la salida de la fuente de señal para la relación I/N de 0 dB y también se midió y registró el nivel real inyectado en el trayecto de recepción del radar. Conociendo la fijación de la fuente de señal para la I/N de 0 dB, se pudo fijar la fuente de señal para cualquier otra I/N deseada ajustando el nivel de salida de la fuente de señal. La prueba se realizó en puntos de nivel de interferencia correspondientes al nivel de I/N de -15 dB, -12 dB, -10 dB, -6 dB, -3 dB, 0 dB, +3 dB y +6 dB. La Fig. 10 proporciona los resultados de las mediciones de ruido del receptor con y sin presencia de interferencia para las señales de prueba W-AMDC.

FIGURA 10

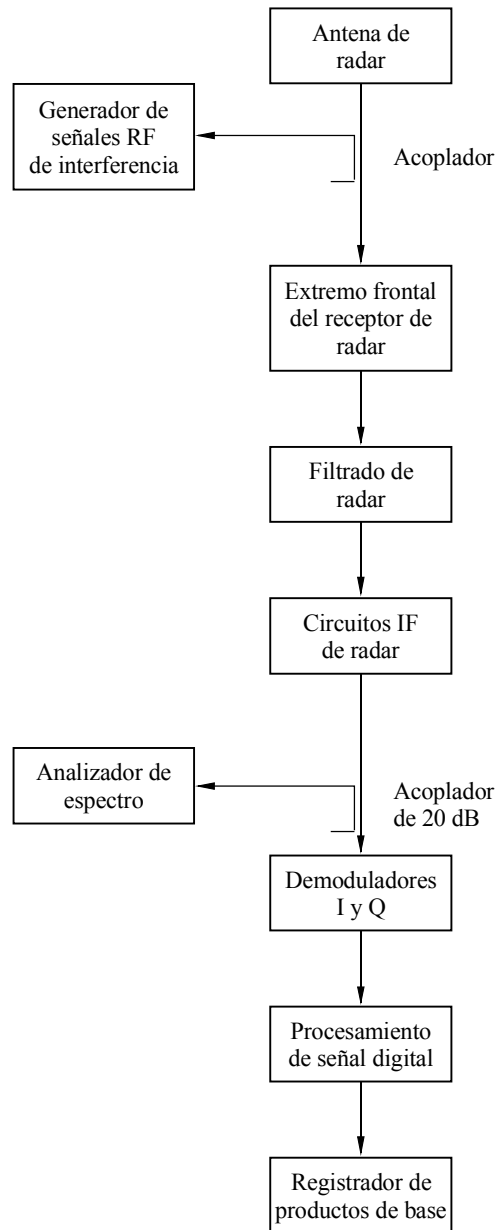
Espectro de ruido de calibración de I/N de 0 dB (57,55 MHz FI frecuencia central) para W-CDMA

El radar se fijó para explorar la atmósfera, que en lo adelante se denomina una «exploración volumen» en una elevación de antena sin interferencia, seguida por una exploración de volumen con interferencia. Para cada exploración de volumen, con o sin interferencia, la antena hizo dos rotaciones completas que permitieron cortes de elevación en la misma elevación utilizando dos PRF diferentes. La PRF utilizada en la primera rotación es una PRF baja optimizada para recoger el producto reflectividad de base, y la usada en la segunda rotación es alta, para recoger los datos de velocidad radial media y anchura de espectro. Se continuó alternando el esquema de exploraciones de volumen, con y sin interferencia, para los niveles de interferencia de -15 dB a $+6$ dB. Este método de prueba proporcionó una exploración de volumen inmediatamente antes y después de cada exploración de volumen de interferencia, que se pudo utilizar como referencias de base para determinar los efectos estadísticos de la interferencia. Durante toda la prueba, los datos del radar de los productos básicos se registraron para análisis.

La Fig. 11 muestra el montaje de prueba que consiste en el generador de señales que alimenta un acoplador RF donde la señal de interferencia es combinada con la señal hacia atrás del radar recibida a la entrada del receptor. Después el receptor amplifica y convierte la señal, reduciéndola, a FI, donde es supervisada en un analizador de espectro. Las salidas I y Q son digitalizadas y procesadas para proporcionar los productos de base meteorológicos reflectividad, velocidad media y anchura de espectro. Los productos de base fueron registrados para el análisis estadístico. No fue factible efectuar la prueba con cada uno de los tipos de señal de interferencia, a todas las velocidades de datos y esquemas de modulación debido al gran número de combinaciones. Se seleccionaron las señales de prueba que abarcasen señales AMDC y AMDT, así como varios esquemas de modulación y una gama de velocidades de datos.

FIGURA 11

Diagrama de bloques de montaje de prueba



1464-11

5 Hipótesis sobre el análisis de los datos, metodología y resultados

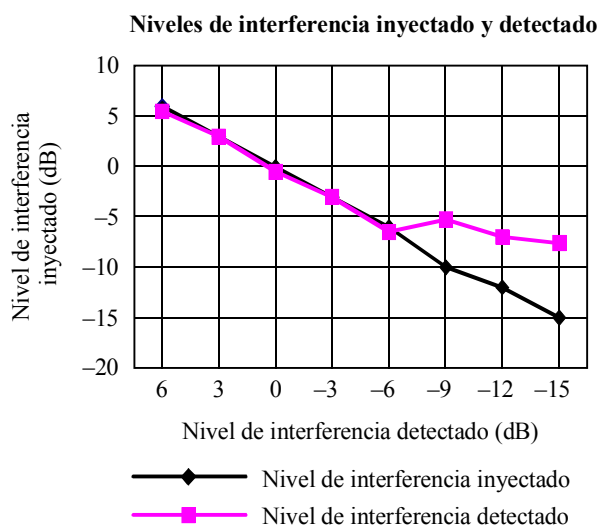
Los radares probados en el pasado han sido utilizados para fines de navegación, donde se detectan blancos de puntos. El radar meteorológico recoge muchos tipos diferentes de datos cuando realiza una exploración de volumen de la atmósfera y presenta datos sobre la atmósfera para 360° completos en acimut y hasta elevaciones del orden de 60°. Para informes previos, cuando el radar seguía blancos de puntos, el análisis de los efectos de la interferencia sobre la probabilidad de detección a menudo era suficiente. La interferencia en estos tipos de sistema frecuentemente enmascara los blancos deseados, o crea blancos falsos. En el radar meteorológico, donde los datos son recogidos y analizados para un volumen de la atmósfera, el funcionamiento del radar no está caracterizado por el uso de probabilidad de detección. El análisis de los datos debe adoptar un

enfoque muy diferente para proporcionar resultados significativos. En vez de estudiar los efectos sobre la probabilidad de detección, el análisis estadístico se efectúa sobre los datos meteorológicos de nivel bajo para cada respuesta de distancia recibida. El estudio de las respuestas visuales presentadas en la pantalla del radar sí muestra algunos efectos sobre la interferencia, pero no proporciona un análisis científico de los resultados sobre los productos meteorológicos generados, tales como estimación de la intensidad de lluvia, velocidad del viento, o detección de cortes.

5.1 Hipótesis

- Como se ha indicado anteriormente, el procedimiento de prueba utilizado para introducir señales de interferencia en el receptor del radar requirió introducir un nivel de interferencia conocido en la entrada del radar. El proceso de análisis de datos es para determinar gráficamente el nivel de I/N en el cual una polarización de 1 dB aprovechará este nivel de interferencia conocido.
- Para este radar en particular y con la tecnología actual, la señal utilizable mínima es de 3 dB por debajo del umbral mínimo de ruido.
- Para el producto de la reflectividad, la relación I/N máxima requerida es igual al nivel de interferencia por debajo de la señal que resulta en una polarización de 1 dB más el nivel de señal mínimo que tiene que ser extraído (–9 dB del § 2.2).
- Para el producto de anchura del espectro, la relación I/N máxima es igual al nivel de interferencia por debajo de la señal que da lugar a una diferencia de 1 m/s en la anchura del espectro (–14,4 dB del § 2.4).
- El sistema utiliza el procesamiento para suprimir los efectos de ruido, permitiendo que el radar procese señales por debajo del umbral mínimo de ruido. En un sistema que no contiene efectos residuales de ruido, cabría esperar que la interferencia sea introducida en la entrada del receptor para seguir linealmente el nivel de interferencia que se detectó mediante el análisis de datos. La Fig. 12 compara los niveles relativos de la interferencia que fue inyectada en la entrada del receptor con el nivel de referencia detectado mediante el análisis de datos. Se puede observar una divergencia de aproximadamente –6 dB.

FIGURA 12



Este efecto residual repercute sobre nuestro análisis de la manera siguiente:

- *Reflectividad*: Ningún efecto, dado que la técnica gráfica utilizada para determinar el nivel en el cual se produce un sesgo de 1 dB en la reflectividad es relativo y no es influido por este efecto residual.
- *Anchura de espectro*: El ruido residual que está presente como resultado de las incertidumbres asociadas al establecimiento de los niveles de interferencia absolutos y a las correspondientes al proceso de eliminación del ruido, repercute sobre la capacidad de terminar gráficamente el nivel en el cual la diferencia de anchura de espectro excede de 1 m/s.

Se pueden utilizar los datos de la Fig. 12 para compensar los errores introducidos por el uso de una técnica gráfica para determinar el nivel en el que la diferencia de anchura de espectro es de 1 m/s. El Cuadro 8 enumera los valores de corrección que se aplican al análisis de anchura de espectro. Estos datos no se requieren para el análisis de la reflectividad.

CUADRO 8

Valores de corrección del nivel

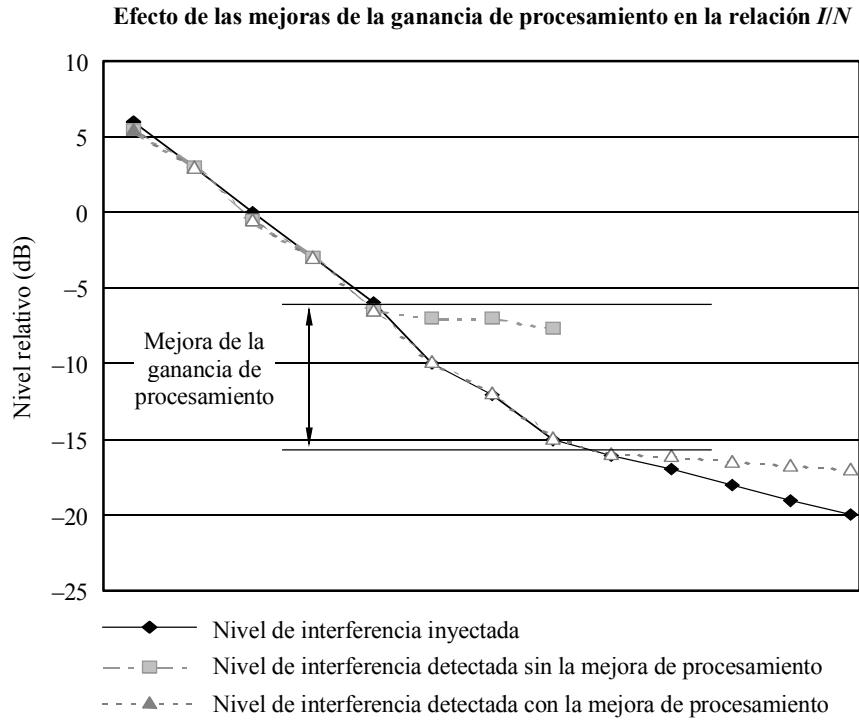
<i>I/N</i> (dB) del nivel de la interferencia inyectada – A	<i>I/N</i> (dB) del nivel de la interferencia detectada – B	Valores de corrección (B – A)
6	5,5	–0,5
3	3	0
0	–0,5	–0,5
–3	–3,0	–0,0
–6	–6,5	–0,5
–10	–5,25	4,75
–12	–7	5
–15	–7,6	7,4

La variabilidad adicional que se acumula a los errores del análisis de los datos actúa como una función de estimación gráfica de los puntos de datos medios y asociados.

La introducción de las mejoras del radar analizadas en el § 6 dará unos 10 dB de potencia de procesamiento, lo que se traduce en una reducción del nivel mínimo de ruido efectivo en un valor equivalente a la mejora de detección. El resultado final es que el punto en que la sensibilidad real del radar a la interferencia se aparta de la curva teórica de la Fig. 13 disminuirá una cantidad igual a la potencia de procesamiento. La Fig. 12 muestra los resultados de las pruebas que se desvían respecto a la teoría en una relación $I/N = -6$ dB. La introducción de mejoras que dan 10 dB de potencia de procesamiento trasladará ese punto a una $I/N = -16$ dB. No obstante, el valor al que se degrada la calidad más allá de los requisitos del sistema debido a la interferencia (sesgo de 1 m/s) impone que la I/N sea igual a $-14,4$ dB como se demostró mediante cálculos y mediciones anteriores.

NOTA 1 – Los efectos de las mejoras propuestas en el receptor que se ilustran en la Fig. 13 son teóricos y no se basan en mediciones reales.

FIGURA 13



1464-13

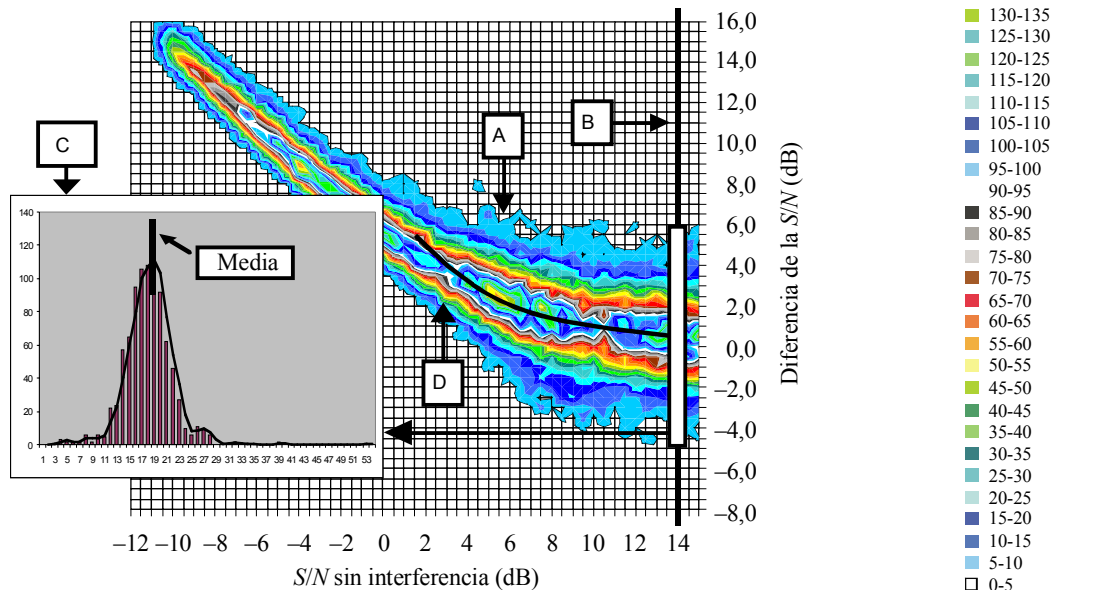
5.2 Metodología del análisis de datos

Se recopilaron datos de una serie de exploraciones de volumen (§ 4) y se procesaron utilizando los algoritmos de generación de productos de radar. Los datos recopilados representaban miles de puntos de datos que, en función de la exploración de volumen, se segmentaron en 920 grupos según 360 radiales. Se elaboró un programa de computador para analizar los datos. En un nivel elevado, este programa distribuyó los datos en dos conjuntos, según la relación S/N sin interferencia (S/N) y la relación S/N con interferencia $(S + I + N)/N$. Se calculó un tercer conjunto de diferencia de relación S/N que contenía la diferencia entre la relación S/N sin interferencia (S/N) y la relación S/N con interferencia $(S + I + N)/N$. El contenido de este grupo se estratificó mediante cómputo de grupo (relación S/N sin interferencia). Se reunieron en estos grupos los números de entradas con el mismo valor, se dió un código de color y se representaron. La Fig. 14-A muestra la regresión, que representa un diagrama de contorno codificado por color.

Cortando este diagrama de contorno en un nivel específico de la relación S/N sin interferencia (Fig. 14-B) se obtiene una visión más detallada de la distribución de las diferencias de la relación S/N . Los valores asociados a la variación de las diferencias de la relación S/N contenidas en el grupo de la relación S/N sin interferencia que se define para cualquier nivel dado de la relación S/N sin interferencia de 14 dB se representan en forma de diagrama de barras en la Fig. 14-C. El elemento de interés es la media de esta distribución, pues da el valor medio de la diferencia de la relación S/N debida a la interferencia para un valor específico de la relación S/N sin interferencia. Se puede determinar el valor medio de la diferencia de la relación S/N para cada relación S/N sin interferencia y a partir de ahí trazar una línea única (Fig. 14-D) que represente el valor medio de la diferencia de la relación S/N en función de la relación S/N sin interferencia. Esto constituye la base de los datos que se utilizarán para un análisis gráfico que permita estimar el sesgo medido de la señal más la interferencia en presencia de interferencia.

FIGURA 14

Distribución de frecuencia de las diferencias de la relación S/N estratificadas por relación S/N sin interferencia para la reflectividad



1464-14

La regresión de la diferencia de potencias con y sin interferencia (diferencia de la relación S/N) de la señal sin interferencia (relación S/N sin interferencia) es el sesgo expresado en función del nivel de la señal, pues ésta es la diferencia entre el nivel verdadero de la señal y la señal más la interferencia, que se interpreta como señal en presencia de interferencia.

Para una diferencia de la relación S/N de 3 dB, es decir, un factor de 2, el nivel de la interferencia es igual al nivel de la señal. Como el procesamiento elimina los efectos del ruido, puede descartarse la potencia de ruido. Ello permite estimar el nivel de la interferencia y sirve como punto de referencia conveniente. El sesgo en la medición de la señal más la interferencia puede especificarse como nivel de la señal relativo al nivel de la interferencia o relación S/I . Como el ruido del sistema es un nivel de la señal conocido, el nivel de la interferencia puede expresarse como relación entre la S/N y entre la I/N .

El comportamiento previsto de la regresión es:

- Cuando la señal aumenta en relación a la interferencia, la diferencia disminuye.
- Cuando la señal y la interferencia son iguales, la diferencia de la relación S/N es de 3 dB.
- Cuando la señal disminuye en relación con la interferencia de la relación S/N , la diferencia se iguala a la relación de interferencia.

Este comportamiento puede verse en el diagrama de contorno/regresión de la Fig. 14-A. Tomando el punto de 3 dB como referencia, se puede determinar gráficamente la relación I/S para toda diferencia de relación S/N , si se toma simplemente la diferencia entre el nivel de la relación S/N sin interferencia asociado a un nivel de la diferencia de la relación S/N de 3 dB y un nivel de la relación S/N sin interferencia asociado a la diferencia de la relación S/N de interés. Como la relación I/S para una diferencia de relación S/N de 3 dB se iguala a cero, esta diferencia será la relación I/S asociada

de las incertidumbres en la fijación del nivel de la interferencia inyectada y de las correspondientes al análisis gráfico. En particular, la función de regresión varía lentamente en la parte que se utiliza para la evaluación del nivel de la interferencia inyectada, I , y de la S/N para la que se produce el sesgo de 1 dB, lo que hace que los resultados sean especialmente sensibles a toda variación de las condiciones de la medición y del análisis gráfico.

Hay que reducir S_u hasta S_m a fin de cumplir el criterio del sesgo de 1 dB en la sensibilidad mínima utilizada por el radar. Para lograrlo, se debe disminuir S_u en una cantidad equivalente a:

$$I - (S/N + S_m)$$

Esto da la I/N equivalente necesaria para asegurar que no se rebasa un sesgo de 1 dB en el nivel de sensibilidad mínimo.

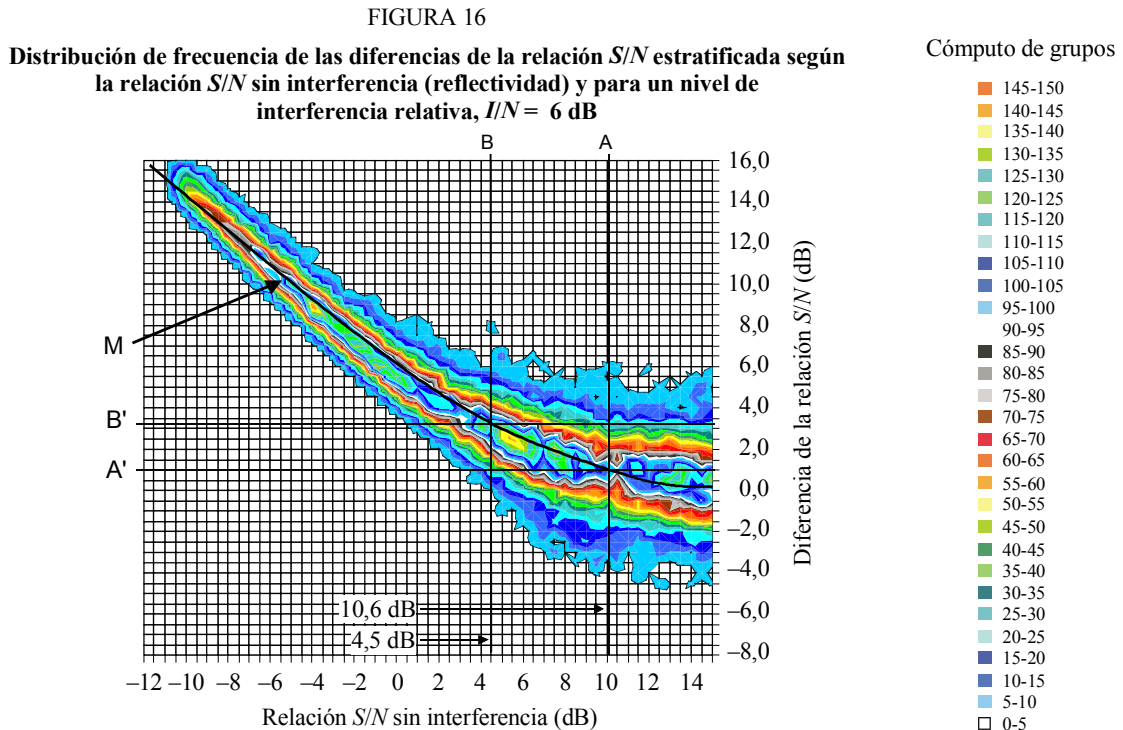
S_m es la relación S/N con interferencia $(S/N) + 3$ dB por debajo de la S_u . Así pues, S_u debe reducirse hasta el valor de S_m . Esto supone una caída de $10,6 + 3$ dB, o un total en este caso de $13,6$ dB.

Por tanto, el nivel de interferencia (I) debe reducirse en $13,6$ dB. Y queda en $4,5$ dB con relación a N . Así pues, en este ejemplo, la I/N equivalente necesaria para lograrlo es:

$$I/N \text{ equivalente} = 4,5 - (10,6 + 3) = -9,1 \text{ dB}^*$$

Estos factores son la base de la técnica del análisis gráfico que se describe en el § 5.3 con el que se compensa la incertidumbre asociada a la fijación del nivel de interferencia absoluto.

5.3 Metodología del análisis de la reflectividad



1464-16

* La I/N equivalente se podría aumentar a $-7,6$ dB si en el cálculo se supone que el valor correcto de la I/N es $+6$ dB, en lugar de $4,5$ dB.

Lo que se desea determinar a partir de la Fig. 16 es la relación I/S que se traduce en una diferencia de 1 dB en la relación S/N relativa al nivel en el que la diferencia de la relación S/N es de 3 dB ($I/S = 0$). A partir de ello se puede determinar la relación de protección I/N adecuada para el producto de reflectividad. Se puede determinar la relación I/S con la información de que se dispone: la media de la regresión, el nivel de la diferencia de relación S/N en el que la relación I/S es = 0 y el nivel de la diferencia de relación S/N que corresponde a una diferencia o un sesgo de 1 dB. El primer paso del análisis gráfico consiste en determinar la media de la regresión (M en la Fig. 16).

El paso siguiente es identificar el punto en el que $I/S = 0$ dB. Corresponde a una diferencia de relación S/N de 3 dB (línea B' de la Fig. 16). Los datos de reflectividad se comprometen para una diferencia de relación S/N de 1 dB (línea A' de la Fig. 16). El paso siguiente es la identificación del punto de intersección entre la media, M, y la diferencia de la relación S/N de 3 dB que corresponde a una I/S de 0 dB (B'). Esto da una relación S/N sin interferencia de 4,5 dB. Se trata de un nivel relativo para el cual la relación I/S es igual a 0 dB. El paso siguiente consiste en identificar el punto en el que la diferencia de relación S/N es igual a 1 dB (línea A'). La línea A' se cruza con la media M en el punto en el que la relación S/N sin interferencia es igual a 10,6 dB. La diferencia entre los dos puntos identificados por la intersección de las líneas A y B con el eje x corresponde al nivel de la I/S que se traduce en un sesgo de 1 dB con relación a un valor de I/S de 0 dB. Este valor puede determinarse tomando simplemente la diferencia entre el punto en el que la línea A se cruza con el eje x y el punto en el que la línea B se cruza con el eje x. Esto da lugar a una relación I/S de $(4,5 - 10,6 = -6,1$ dB). Ésta es la I/S por debajo de la señal mínima recuperada que tiene una relación S/N de -3 dB.

$$I/N \text{ equivalente} = (I/S) + (-3 \text{ dB})$$

Los datos tomados de este análisis gráfico dan el resultado siguiente:

$$I/N \text{ equivalente} = -6,1 \text{ dB} + (-3 \text{ dB}) = -9,1 \text{ dB}$$

Ha de señalarse que, suponiendo que la I/N correcta es 6 dB en lugar de 4,5 dB, la I/N podría aumentar hasta -7,6 dB.

En el Cuadro 9 se detallan los resultados de la utilización de esta técnica de análisis para un único tipo de interferencia a lo largo de toda la gama de niveles de interferencia relativos ensayados (I/N de +6 a -15 dB).

CUADRO 9

Nivel de prueba de la interferencia relativa	Nivel de la I/N equivalente en el que se produce un sesgo de 1 dB
6	-9,1
3	-9,5
0	-9,5
-3	-10
-6	-7,5
-10	-9
-12	-7,5
-15	-8

La media y la desviación típica de este conjunto de datos son:

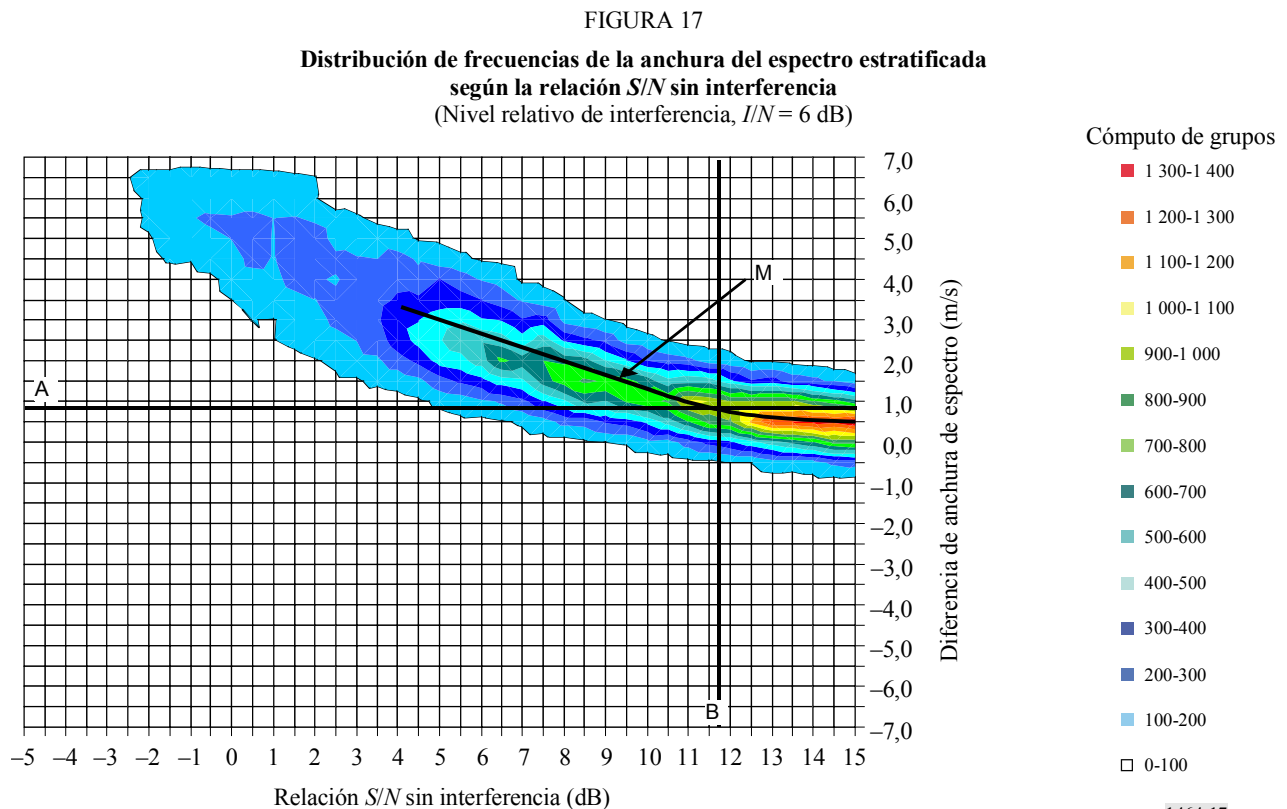
$$\text{Media} = -8,8$$

$$\text{Desviación típica} = 0,9$$

Estos resultados son coherentes y apoyan el resultado teórico que se obtuvo en el § 2.2. No obstante, hay una incertidumbre inherente en estas mediciones.

5.4 Metodología de análisis de la anchura de espectro

Se puede adoptar un método de análisis similar para determinar el nivel en el cual se produce un sesgo de 1 m/s en la anchura de espectro. En este caso, en la Fig. 17 se muestra la regresión que se usa para determinar gráficamente este valor. (Es el mismo conjunto de datos que se utilizó en la Fig. 16.)



El proceso es muy similar al del método utilizado al determinar el nivel de la I/N para el producto reflectividad. Sabemos que el punto en el que se degradan los datos de anchura del espectro más allá de los límites aceptables es el punto en el que el sesgo de la estimación de la anchura del espectro es igual a 1 m/s. Esto corresponde a una diferencia de anchura de espectro de 1 m/s en la Fig. 17 (línea A). Una vez más, se ajusta una media a la regresión y se identifica el punto en el que la línea A se cruza con la media (línea B). Esto corresponde a una relación S/N sin interferencia de 11,75 dB. La relación I/N real que da lugar a una diferencia de anchura de espectro que comprometa los datos de anchura del espectro se define por la ecuación siguiente:

$$I/N (\text{anchura del espectro}) = -((\text{nivel de la relación } S/N \text{ sin interferencia en el cual la diferencia de anchura del espectro es 1 m/s}) - (\text{nivel relativo en el que la relación } I/S \text{ es igual a 1 dB}) - (\text{factor de corrección del nivel}))$$

En este ejemplo, el nivel de la relación S/N sin interferencia para el que la diferencia de anchura de espectro es 1 m/s puede obtenerse a partir de la Fig. 17 y es igual a 11,75 dB.

El nivel para el que la relación I/S de este conjunto de datos es igual a uno puede obtenerse a partir del análisis de reflectividad de la Fig. 16. I/S es igual a uno cuando la diferencia de la relación S/N es igual a 3 dB. En este ejemplo, el nivel (relación S/N sin interferencia) para el que la diferencia de relación S/N es igual a 3 dB, es igual a 4,5 dB.

Dados estos datos, la relación I/N necesaria para cumplir la especificación de anchura del espectro corresponde a lo siguiente:

$$I/N \text{ equivalente (anchura del espectro)} = -(11,75 - 4,5) - 3 - 0,5 = -10,75 \text{ dB}$$

Ha de señalarse que, suponiendo que la I/N correcta sea de 6 dB en lugar de 4,5 dB, la I/N equivalente (anchura del espectro) podría aumentar hasta -9,25 dB.

En el Cuadro 10 se detallan los resultados de la utilización de esta técnica de análisis para un único tipo de interferencia a lo largo de la gama de niveles de interferencia relativos que no resultaban fuertemente afectados por los efectos de ruido residual (I/N de 6 a -6 dB).

CUADRO 10

Nivel de interferencia (dB)	Nivel de la I/N equivalente en el que se produce una diferencia de 1 m/s (dB)
6	-10,75
3	-10,9
0	-12,3
-3	-9,75
-6	-12,25

La media y la desviación típica de este conjunto de datos son:

$$\text{Media} = -11,2$$

$$\text{Desviación típica} = 0,97$$

Para este radar en particular, la relación I/N que se obtuvo de los datos reales de medición de la anchura del espectro es coherente con lo indicado en los § 2.4 y 5.1. No obstante, hay una incertidumbre inherente en estas mediciones.

5.5 Resumen de los resultados de mediciones reales

En el Cuadro 11 se muestran resultados globales de las pruebas utilizando diversas técnicas de modulación de las IMT-2000 como señales de interferencia reales. Estos valores se obtuvieron utilizando la técnica de análisis gráfico descrita en los § 5.2, 5.3 y 5.4 en donde el nivel relativo de interferencia se fijaba a una I/N de 6 dB.

CUADRO 11

Umbral de interferencia medidos (I/N) necesarios para la protección del radar contra interferencia perjudicial

Señal de interferencia		Polarización de reflectividad	Polarización de anchura de espectro
CW		-7,5	-10,5
W-CDMA	4,096 Msímbolos/s	-9,5	-8,75
CDMA-2000-3X (enlace de ida)	3,686 Msímbolos/s	-7,0	-10
CDMA-2000-3X (enlace retorno)	3,686 Msímbolos/s	-9,5	-10,5
EDGE-GMSK	384 ksímbolos/s	-8,75	-10,75
EDGE -8PSK	384 ksímbolos/s	-8,75	-9,75
DECT	1,152 Msímbolos/s	-9,5	-10
Media		-8,6	-10,04
Desviación típica		0,94	0,62

Estos resultados sustentan el valor calculado requerido para la protección de las mediciones del producto reflectividad. Debe señalarse que las cifras del Cuadro 11 se basan en una determinación indirecta del nivel de la I/N inyectada para el que se efectuó la prueba, en comparación con el valor nominal que se pretendía inyectar. La utilización de los valores de la I/N nominal pretendida en vez del valor determinado indirectamente, puede modificar esos valores.

Como se ha indicado anteriormente, fue difícil realizar mediciones y análisis de la velocidad media; no obstante, como la velocidad radial media es la menos sensible a la interferencia, los resultados no afectan los niveles de interferencia global que el radar puede admitir.

Los resultados sugieren que el valor medido de la relación I/N necesario para proteger el producto anchura de espectro es ligeramente inferior a los valores que se calcularon en el § 2.4. Según se analiza también anteriormente, las actuales limitaciones en el proceso de calibración y supresión de ruido efectuado por el procesador de datos de bajo nivel restringen las mediciones de los criterios de protección necesarios para las mediciones de la anchura de espectro. Actualmente se está efectuando mejoras del receptor y del procesador de los radares, que permitirán al sistema acercarse a sus criterios de diseño deseados originalmente, o rebasarlos. Dichas mejoras se describen más detalladamente en el § 6.

6 Mejoras de los radares

El sistema de radar utilizado para es prueba es uno que ha estado funcionando en una administración alrededor de 11 años. Estos sistemas están siendo perfeccionados mediante la incorporación de adelantos de los sistemas de procesamiento de señales. Estas mejoras permitirán la detección de señales a un nivel que es aproximadamente 10 dB más bajo que el nivel actual.

Estas mejoras son impulsadas por varias necesidades:

- mejora del funcionamiento de las mediciones por encima de la capa de frontera planetaria;
- detección de pequeñas gotas de agua y precipitación fina que puede resultar en hielo sobre las aeronaves;
- con el evento de mediciones de polarización doble, mejoras de la supervisión del proceso desarrollo de fenómenos meteorológicos.

Todas estas necesidades requieren una calidad de detección que sea unos 10 dB mejor que la que puede lograrse hoy con los actuales sistemas de radares meteorológicos.

Para satisfacer estas necesidades, el funcionamiento del radar puede mejorarse aumentando la potencia de transmisión, reduciendo el umbral mínimo de ruido del receptor o aumentando la potencia computacional del radar.

El aumento de la potencia del transmisor no es rentable. La reducción del umbral mínimo de ruido pudiera realizarse extendiendo la anchura de los impulsos, pero esto último reduce la anchura de banda requerida del filtro adaptado y, por tanto, la potencia de ruido dentro de la FI del receptor. El aumento de la anchura de los impulsos por un factor de 2 aumenta el volumen de muestras por un valor de 3 dB. La adaptación de la anchura de banda del receptor resulta en una reducción del ruido del receptor de 3 dB. Esto produce una mejora de detección total de 6 dB. Lamentablemente, las limitaciones del diseño del ciclo de trabajo del transmisor no permitirán ampliar la anchura de los impulsos para el sistema utilizado en estas pruebas. Cabría reducir la temperatura de ruido del receptor, pero sólo se puede lograr una reducción de 1 a 2 dB. Por consiguiente, la manera más económica de lograr estas mejoras es potenciar el procesamiento de señales.

La polarización doble requiere dividir la potencia de señal transmitida entre alimentadores de antena polarizados horizontal y verticalmente, lo que resulta en una reducción de 3 dB de la potencia de transmisión en una sola polarización. Esta reducción de la potencia de transmisión debe ser compensada en otra parte, para no degradar la calidad de funcionamiento.

La reducción de la potencia de transmisión para cada polarización combinada con el aumento de la capacidad de detección resulta en un requisito mínimo de unos 10 dB de mejora en el funcionamiento del radar. El aumento de la potencia de procesamiento del radar con un soporte físico mejorado permitirá realizar algoritmos de procesamiento de datos que no estaban disponibles previamente. Este procesamiento adicional utilizará integración coherente y detección en el dominio de la frecuencia. El radar recoge actualmente todos los parámetros necesarios para ejecutar estas funciones, pero la limitación de la potencia de procesamiento ha impedido su realización. Las mejoras proyectadas, en desarrollo actualmente, eliminarán la limitación de la potencia de procesamiento. La integración coherente, aplicada en este radar, ha demostrado una mejora de 10 dB de la detección. La detección en el dominio de la frecuencia, que también está en desarrollo, mejorará en unos 10 dB la calidad de funcionamiento. Con la detección en el dominio de la frecuencia, el espectro es dividido en coeficientes discretos, y el número real de coeficientes es determinado por la velocidad de rotación y el modo de funcionamiento de la antena. En los modos de tormentas actuales, el número de muestras varía de 41 a 111. El procesamiento en el dominio de la frecuencia (cálculo de la densidad espectral) en la señal deseada es confinado a unos pocos coeficientes espectrales, mientras que el ruido es extendido en todos los coeficientes en un nivel mucho más bajo.

Las mejoras del funcionamiento del radar que resultan de la mayor potencia de procesamiento no reducen el umbral de ruido mínimo del receptor, pero el efecto es una reducción del umbral de ruido mínimo efectivo proporcionando la capacidad de recuperar señales de interés en niveles de señal mucho más bajos. La diferencia entre el umbral de ruido mínimo real y el umbral de ruido mínimo efectivo es la mejora de detección del procesamiento.

7 Resumen general

Los resultados de las pruebas respaldan la necesidad de un valor de protección de una relación I/N que podría ser de sólo -9 dB para los datos de reflectividad básica en las condiciones que se indican en los puntos anteriores. Los cálculos muestran que el valor de I/N en el cual la degradación de la calidad de funcionamiento de la anchura de espectro rebasa los requisitos del sistema (polarización ≥ 1 m/s) es incluso inferior ($-14,4$ dB), pero las mediciones sólo respaldan una I/N de -10 dB para la anchura del espectro.

A fin de proteger el producto meteorológico más sensible, debe utilizarse la $I/N = -10$ dB.
