

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R M.1464-2
(02/2015)

Características de los radares de radiolocalización no meteorológicos y características y criterios de protección para estudios de compartición de los radares de radionavegación aeronáutica y del servicio de radiodeterminación que funcionan en la banda de frecuencias 2 700-2 900 MHz

Serie M

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



Prólogo

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

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

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

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

Series de las Recomendaciones UIT-R

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

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

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

Publicación electrónica
Ginebra, 2016

© UIT 2016

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

RECOMENDACIÓN UIT-R M.1464-2

Características de los radares de radiolocalización no meteorológicos y características y criterios de protección para estudios de compartición de los radares de radionavegación aeronáutica y del servicio de radiodeterminación que funcionan en la banda de frecuencias 2 700-2 900 MHz

(2000-2003-2015)

Cometido

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.

Palabras clave

Aeronáutico, características, criterios de protección, radionavegación

Abreviaturas/glosario

AESA	Sistema de exploración electrónica activo (<i>active electronically scanned array</i>)
AMDT	Acceso múltiple por división en el tiempo
ATC	Control del tráfico aéreo (<i>air traffic control</i>)
CFAR	Tasa de falsas alarmas constante (<i>constant false alarm rate</i>)
CPI	Intervalo de procesamiento coherente (<i>coherent processing intervals</i>)
CW	Onda continua (<i>continuous wave</i>)
MDP-4	Modulación por desplazamiento de fase cuaternaria
MLT	Umbral de nivel medio (<i>mean level threshold</i>)
PESA	Sistema de exploración electrónica pasivo (<i>passive electronically scanned array</i>)
PPS	Impulsos por segundo (<i>pulses per second</i>)
PRF	Frecuencia de repetición de impulsos (<i>pulse repetition frequency</i>)
STC	Control de tiempo de sensibilidad (<i>sensitivity time control</i>)
TOP	Tubo de ondas progresivas

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que las características requeridas en cuanto a antena, propagación de la señal, detección del objetivo y gran ancho de banda necesario 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 no meteorológicos vienen determinadas por la misión del sistema y varían ampliamente incluso dentro de una banda de frecuencias;
- 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 de frecuencias 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;
- 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);
- i) que la Recomendación UIT-R M.1849 contiene los aspectos técnicos y de explotación de los radares meteorológicos en tierra y que pueden utilizarse como directrices para el análisis de la compartición y la compatibilidad entre los radares meteorológicos en tierra y los sistemas de otros servicios;
- j) que los radares en esta banda de frecuencias 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 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.

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

Anexo 1

Características de los radares de radionavegación aeronáutica y de radiolocalización no meteorológicos

1 Introducción

La banda de frecuencias 2 700-2 900 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 de frecuencias sobre la base de igualdad con las estaciones del servicio de radionavegación aeronáutica (número 5.423 del RR). La banda de frecuencias 2 900-3 100 MHz está atribuida a los servicios de radionavegación y radiolocalización a título primario. La banda de frecuencias 3 100-3 400 MHz está atribuida al servicio de radiolocalización a título primario.

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 de frecuencias predominante para los radares de aproximación terminal y vigilancia de aeropuerto en el tráfico aéreo civil de todo el mundo.

2 Características técnicas

La banda de frecuencias 2 700-2 900 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 de frecuencias incluyen el ATC y la observación meteorológica. Puede suponerse que las frecuencias de funcionamiento radar se distribuyen uniformemente en la banda de frecuencias 2 700-2 900 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 que funcionan en la banda de frecuencias 2 700-2 900 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 de frecuencias 2 700-2 900 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 de frecuencias 2 700-2 900 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 de frecuencias 2 700-2 900 MHz**

Características	Unidad	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⁾	kW	1 400	1 320	25	450	22	70
Ancho del impulso	µs	0,6	1,03	1,0, 89 ⁽³⁾	1,0	1,0, 55,0	0,4, 20 0,5, 27 ⁽⁴⁾
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 3 dB	MHz	6	5 0,6	2,6 (impulso corto) 5,6 (impulso largo) 1,9			3 típica 2
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
Ganancia del haz principal de la antena	dBi	33,5		34	32,8	34,3 haz bajo 33 haz alto	33,5

CUADRO 1 (Continuación)

Características	Unidad	Radar A	Radar B	Radar C	Radar D	Radar E	Radar F
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 ⁽⁴⁾
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)	dB _i		+7,3	+9,5 3,5°			+7,5 0 a -3 dB _i
Altura de la antena	m	8					8 a 24
Anchura de banda de 3 dB de FI del receptor	MHz	13	0,7	1,1		1,2	4
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	-4	-6	-14			-10
Nivel de saturación en sintonía del receptor	dBm		-45				
Anchura de banda de 3 dB de RF del receptor	MHz	13	12	345			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 ⁽⁵⁾		Mejora por realimentación	⁽⁶⁾				
Distribución geográfica		Todo el mundo					
Fracción del tiempo de utilización		100					

CUADRO 1 (Continuación)

Características	Unidad	Radar F1	Radar F2
Tipo de plataforma (a bordo de aeronave, a bordo de barco, en tierra)		En tierra, ATC	En tierra ATC
Gama de sintonización	MHz	2 700-2 900 ⁽⁷⁾	2 700-2 900 ⁽⁷⁾
Modulación		P0N, Q3N	P0N, Q3N
Potencia de transmisión en la antena ⁽²⁾		40 kW	160 kW
Ancho del impulso	µs	1,0 (SP) 60,0 (LP)	1,0 (SP) ≤ 250,0 (LP)
Tiempo de elevación/ caída del impulso	µs	0,2 (SP), 3 (LP)	0,2 (SP), 3 (LP)
Tasa de repetición de impulsos	pps	320-6 100 (SP) 320-1 300 (LP) (8)	320-4 300 (SP) 320-1 500 (LP) (8)
Ciclo de trabajo	%	0,2 ⁽⁹⁾ -0,6 (SP) ≤ 12,0 ⁽¹⁰⁾ (LP)	0,2 ⁽⁹⁾ -0,4 (SP) ≤ 12,0 ⁽¹⁰⁾ (LP)
Ancho de banda de impulsos	MHz	3	3
Ancho del subimpulso codificado en fase		No aplicable	No aplicable
Relación de compresión		180	≤ 750
Ancho de banda de emisión RF: -20 dB -3 dB	MHz	3,2 (SP) / 5,0 (LP) 0,6 (SP) / 1,2(LP) (11)	3,2 (SP) / 5,0 (LP) 0,6 (SP) / 1,2 (LP) (11)
Dispositivo de salida		Estado sólido	Estado sólido
Tipo de diagrama de antena (puntual, abanico, cosecante cuadrado, etc.)	grados	Cobertura de haz puntual hasta 70 000 pies	Cobertura de haz puntual hasta 100 000 pies
Tipo de antena (reflector, sistema en fase, sistema de ranuras, etc.)		Sistema en fase, 4 caras (sistema en fase de 4 metros de diámetro por cara)	Sistema en fase, 4 caras (sistema en fase de 8 metros de diámetro por cara)
Polarización de la antena		Lineal: horizontal y vertical; circular	Lineal: horizontal y vertical; circular
Ganancia del haz principal de la antena	dBi	41	46
Apertura del haz en elevación de la antena	grados	1,6-2,7	0,9-1,5
Apertura del haz acimutal de la antena	grados	1,6-2,7	0,9-1,4
Velocidad de exploración horizontal de la antena	grados	No aplicable	No aplicable
Tipo de exploración horizontal de la antena (continua, aleatoria, 360°, sectorial, etc.)		Irregular para cubrir 360°	Irregular para cubrir 360°
Velocidad de exploración vertical de la antena	grados/s	No aplicable	No aplicable
Tipo de exploración vertical de la antena (continua, aleatoria, 360°, sectorial, etc.)	grados	Irregular para cubrir el volumen necesario	Irregular para cubrir el volumen necesario
Niveles de los lóbulos laterales de la antena (primer lóbulo lateral y lóbulos laterales distantes)	dB	17 en transmisión, 25 en recepción	17 en transmisión, 25 en recepción
Altura de la antena	m	Variable	Variable

CUADRO 1 (Fin)

Características	Unidad	Radar F1	Radar F2
Ancho de banda de 3 dB de FI del receptor	MHz	1,2 a -6 dB (SP) 1,8 a -6 dB (LP)	1,2 a -6 dB (SP) 1,6 a -6 dB (LP)
Factor de ruido del receptor	dB	< 6	< 6
Señal discernible mínima	dBm/ MHz	-110	-110
Punto de compresión de ganancia 1 dB del primer paso del receptor	dBm	10	10
Nivel de saturación en sintonía del receptor	dBm	No aplicable	No aplicable
Ancho de banda de 3 dB de RF del receptor	MHz	200	300
Niveles de saturación y tiempos de recuperación en RF y en FI del receptor		13 dBm, < 500 ns	13 dBm, < 500 ns
Anchura de banda del filtrado Doppler	Hz		
Fracción del tiempo de utilización	%	100	100

- (1) Algunos funcionan en la gama de frecuencia 2 700-3 100 MHz. Muchos de estos sistemas necesitan más de una frecuencia portadora en la gama de sintonización para funcionar adecuadamente.
- (2) Los sistemas fijos funcionan hasta 750 kW o 1 MW.
- (3) Este radar utiliza dos portadoras fundamentales con una separación mínima de 30 MHz.
- (4) Depende de la gama.
- (5) 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.
- (6) A continuación se representan las características que están disponibles en algunos sistemas de radar: frecuencias de repetición de impulsos (FRI) seleccionables, filtrado Doppler.
- (7) Gama de sintonización 2,7-3,0 GHz cuando se sustituye un radar meteorológico por un sistema multifunción que realiza funciones tanto de radionavegación aeronáutica como meteorológicas. Las características y criterios de protección del funcionamiento meteorológico se encuentran en la Recomendación UIT-R M.1849.
- (8) FRI muy elevadas utilizadas sólo con grandes ángulos de elevación.
- (9) El ciclo de trabajo de un impulso corto es del 0,2 % en el barrido con la elevación más baja (horizonte).
- (10) La combinación del ancho del impulso y la FRI se ajustará para mantener el ciclo de trabajo por debajo del 12%.
- (11) Ancho de emisión de RF a -6/-40 dB: 1,3/10,4 MHz para SP; 2,0/ 6,2 MHz para LP.

CUADRO 2

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

Características	Unidades	Radar I	Radar J	Radar K	Radar L	Radar M
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	En aeronave, en tierra
Gama de sintonía	MHz	2 700-3 400	2 700-3 100	2 700 a 3 100 2 900 a 3 400	Todo el ancho de la banda de frecuencias hasta 25%	2 700-3 400
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	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	P0N, Q3N
Potencia del transmisor a la antena	kW	60 típico	60 a 200	1 000 típico	30 a 100	60 a 1 000
Ancho del impulso	µs	0,4 ⁽¹⁾ a 40	0,1 ⁽¹⁾ a 200	> 100	Hasta 2	0,1 a 1 000
Tiempo de elevación/caída del impulso	µs	10 a 30 típico	10 a 30 típico	No comunicado	No comunicado	> 50 0,05-1,00 ⁽⁶⁾
Frecuencia de repetición de impulsos	pps	550 a 1 100 Hz	300 Hz a 10 kHz	< 300 Hz	Hasta 20 kHz	300 Hz a 10 kHz
Ciclo de trabajo	%	2,5 máxima	10 máxima	Hasta 3	30 máxima	20 máxima
Ancho de banda de impulso	MHz	2,5	Hasta 10	> 100	Depende de la modulación	Hasta 20
Relación de compresión		Hasta 100	Hasta 300	No aplicable	No comunicado	Hasta 20 000
Anchura de banda de emisión RF: -20 dB -3 dB	MHz	3,5 2,5	15 10	> 100	No comunicado	25
Dispositivo de salida		TOP	TOP o estado sólido	Klystron CFA	Elementos activos	Estado sólido
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	Haz puntual 3D o cosecante cuadrado 2D
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	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	Depende del número de elementos Típicamente entre 1,1 y 5

CUADRO 2 (Continuación)

Características	Unidades	Radar I	Radar J	Radar K	Radar L	Radar M
Polarización de la antena		Lineal o circular o conmutada	Lineal o circular o conmutada	Fija, lineal o circular	Alineador fijo	Mixta
Ganancia del haz principal de la antena	dBi	33,5 típico	Hasta 40	> 40	Hasta 43	Hasta 40
Apertura del haz en elevación de la antena	grados	4,8	1,5 a 30	Típico 1	Depende del número de elementos	Depende del número de elementos Típicamente entre 1 y 30
Velocidad de exploración horizontal de la antena	grados/s	45 a 90	30 a 180	Típico 36	Exploración sectorial rotación instantánea hasta 360	30 a 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	Continuo 360 + exploración sectorial + exploración sectorial aleatoria
Velocidad de exploración vertical de la antena	grados/s	No aplicable	Instantánea	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	0 a 90
Niveles de lóbulos laterales de la antena (primer lóbulo lateral y lóbulos laterales distantes)	dB dBi	26 35	> 32 típico < -10	> 26 típico < 0	No comunicados	> 32 típico < -10
Altura de la antena sobre el suelo	m	4 a 30	4 a 20	5	4 a 20	4 a 50
Anchura de banda FI del receptor (3 dB)	MHz	1,5 largo 3,5 corto	10	No comunicada	No comunicada	10-30
Factor de ruido del receptor ⁽²⁾	dB	2,0 máximo	1,5 máximo	No comunicado	No comunicado	1,5 máximo
Señal discernible mínima	dBm	-123 impulso largo -104 impulso corto	No comunicada	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}	5×10^{-5}

CUADRO 2 (Fin)

Características	Unidades	Radar I	Radar J	Radar K	Radar L	Radar M
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	1×10^{-10}
Ancho de banda de 3 dB del receptor RF	MHz	400	400	150 a 500	Hasta toda la banda de frecuencias	400
Niveles de saturación RF y FI del receptor y tiempos de recuperación		No comunicados	No comunicados	No comunicados	No comunicados	No comunicados
Ancho de banda de filtrado Doppler		No comunicado	No comunicado	No comunicado	No comunicado	No comunicado
Características de rechazo de interferencia ⁽³⁾		(4)	(4) y (5)	(4) y (5)	Formación de haz adaptable ⁽⁴⁾ y ⁽⁵⁾	No comunicadas
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	Zonas litorales y mar abierto Todo el mundo sitio fijo transportable
Fracción de tiempo de utilización	%	100	Depende de la misión	Depende de la misión	Depende de la misión	100

(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.

(6) Este tiempo de elevación/caída corresponde a impulsos cortos con un ancho de impulso entre 0,1 μ s y 100 μ s.

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 .

2.3 Antenas

Los radares que funcionan en la banda de frecuencias 2 700-2 900 MHz utilizan antenas de tipo reflector parabólico. Los radares ATC tienen un diagrama de elevación de cosecante cuadrado y/o presentan un diagrama de antena de haz estrecho. Como los radares que funcionan en la banda de frecuencias 2 700-2 900 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.

En las aplicaciones terrenales y marítimas se utilizan dos arquitecturas fundamentales de sistemas de antenas en fase. Estas dos tecnologías son el sistema de exploración electrónica pasivo (PESA) y el sistema de exploración electrónica activo (AESA). Los sistemas PESA utilizan transmisores de alta potencia para generar las señales transmitidas, que atraviesan el sistema PESA o se reflejan en él. Durante este proceso de transmisión o reflexión, los haces se dirigen y conforman para ajustarse a las necesidades operativas de cada transmisión.

El tiempo de espera típico de los haces oscila entre decenas y cientos de milisegundos. La tecnología AESA incorpora grandes cantidades de transmisores con menor potencia de cresta en cada uno de los elementos radiantes del sistema. Esta tecnología se basa por lo general en dispositivos de estado sólido cuyos niveles de potencia individuales oscilan entre unos pocos y cientos de vatios. El resultado final es un elevado nivel de potencia radiada con cada uno de los elementos contribuyendo de manera coherente a la conformación de los haces. La mayoría de sistemas ESA móviles tienen aperturas que van desde menos de un metro cuadrado a 20 metros cuadrados. Los sistemas de sitio fijo suelen ser más grandes. La mayoría de antenas ESA utiliza el direccionamiento electrónico tanto en acimut como en elevación. Hay una subclase de sistemas Esa que utiliza el barrido mecánico en el plano acimutal y el direccionamiento electrónico en elevación. Estos sistemas se utilizan ampliamente en las aplicaciones marítimas y terrenales.

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.

En los sistemas que utilizan la comprensión de impulsos, el ancho de banda IF se ajusta al impulso comprimido y actúa como un filtro adaptado para una degradación S/N mínima. Los filtros de compresión de impulso pueden adaptarse parcialmente y, así, aumentar el efecto de la interferencia como ruido. En tal caso, será necesario realizar más estudios o adoptar medidas de compatibilidad para evaluar la interferencia según afecte operativamente al rendimiento del radar.

4 Características operacionales

4.1 Radares de radionavegación aeronáutica

Los radares de vigilancia de aeropuertos funcionan por todo el mundo en la banda de frecuencias 2 700-2 900 MHz. El Cuadro 1 ilustra ocho tipos representativos de radares de ATC como radares A F, incluidos F1 y F2. 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 F, incluidos F1 y F2, 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. Los radares F1 y F2 son los radares de vigilancia aeroportuaria y climáticos. Estos radares están diseñados para ajustarse a los requisitos de vigilancia aeroportuaria de reducir los ecos de las turbinas eólicas, vigilar los sistemas de aeronaves no tripuladas y ofrecer mejores productos de predicción meteorológica para la aviación.

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 de frecuencias 2 700-2 900 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 en la banda de frecuencias 2 700-2 900 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 de radiodifusión en exteriores/periodismo electrónico en la banda de frecuencias 2 700-2 900 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

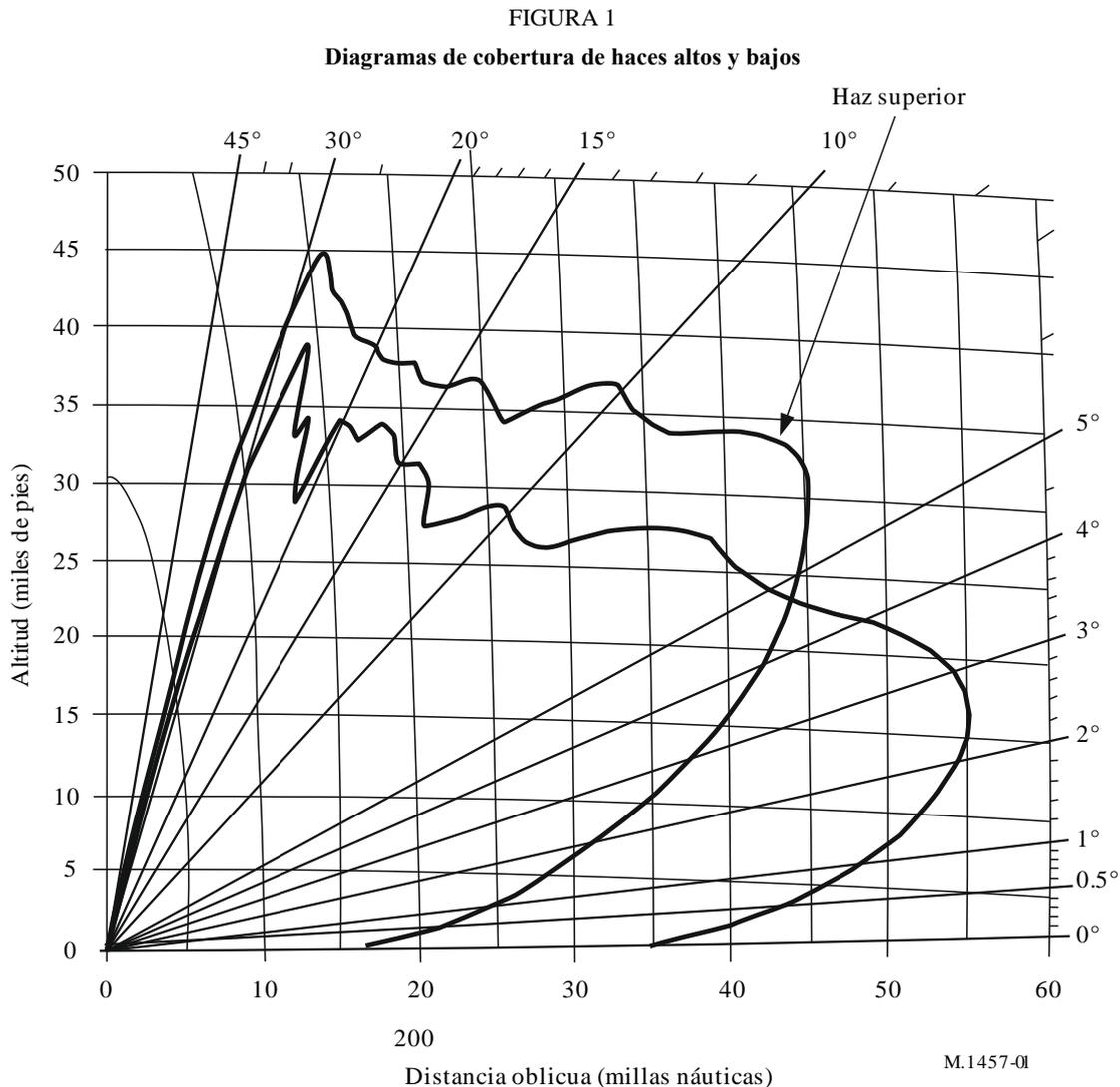
Las administraciones utilizan el radar B para supervisar el tráfico aéreo en las proximidades de los aeropuertos dentro de una distancia de 60 millas náuticas (aproximadamente 111 km). Los valores normales para los principales parámetros de este radar se obtuvieron de los documentos de aprobación reglamentaria, 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 249 088 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 4 483 584 células Doppler de distancia-acimut.

2.3 Características de procesamiento de señales del radar B

2.3.1 Antena

El radar B emplea 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 m² con una probabilidad de detección igual a 0,80.



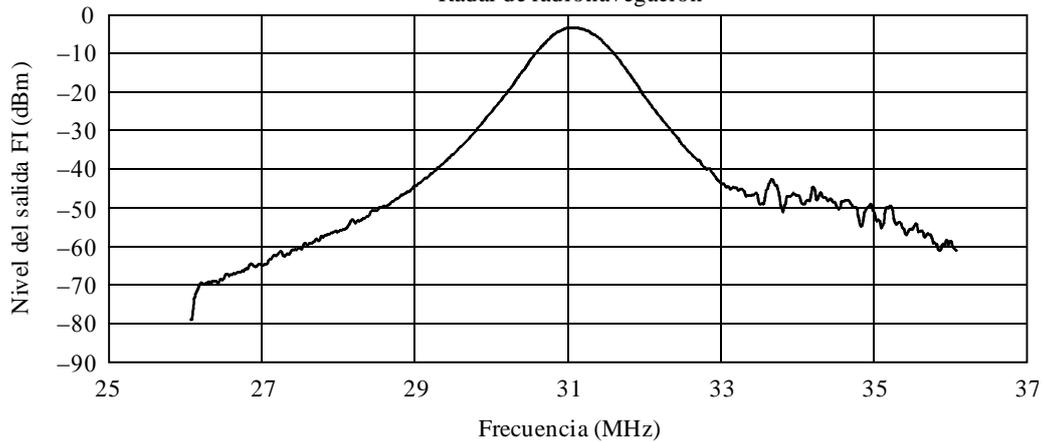
2.3.2 Receptor de blancos del radar B

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

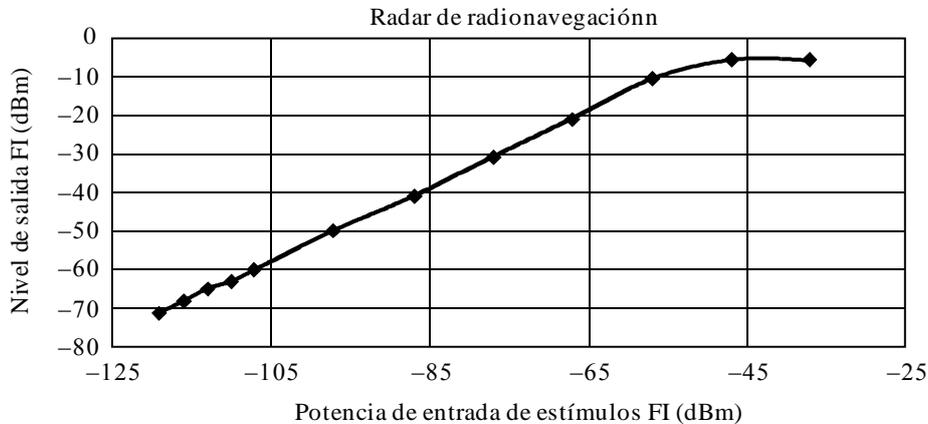
El receptor FI amplifica la salida del receptor RF y detecta sus desplazamientos de fase. El circuito de FI consta de un detector/amplificador vídeo logarítmico de tres etapas con una amplia gama dinámica y un detector de fase I y Q. La salida del receptor del amplificador FI está en 31,07 MHz. Se aplicó 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
Radar de radionavegación



M.1464-02

FIGURA 3
Curva de ganancia entrada/salida del radar B
Radar de radionavegación



M.1464-03

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 $0,77 \mu\text{s}$ (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 tasa de falsas alarmas constante

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.

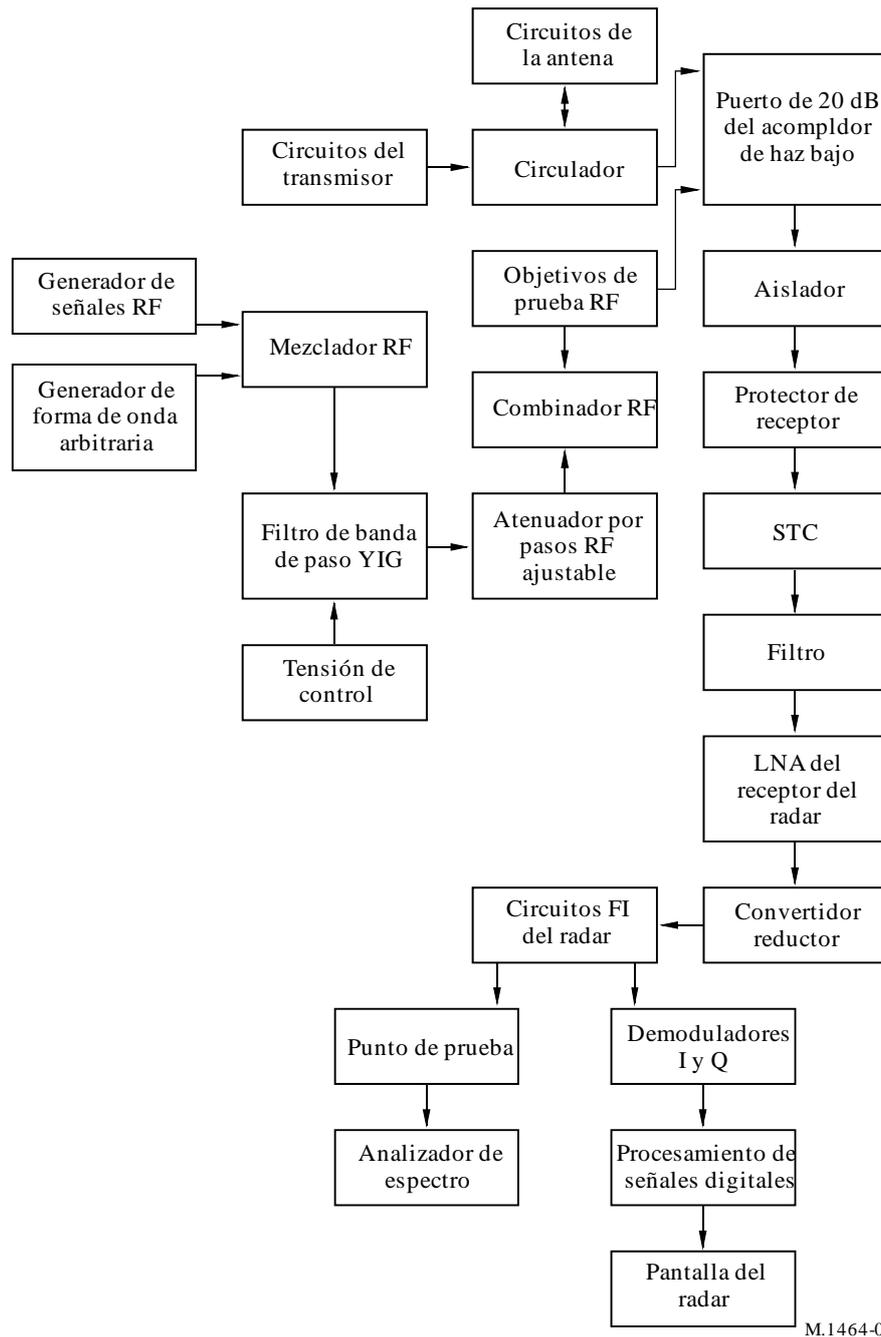
El ruido aleatorio excederá ocasionalmente del MLT y el detector indicará falsamente que un blanco está presente. Mientras más alto es el umbral de detección del nivel medio de la energía de ruido, más baja será la probabilidad de una falsa alarma, y viceversa. Si el umbral de detección es demasiado 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 modulación por desplazamiento de fase cuaternaria (MDP-4) que abarca la banda del receptor del radar aparecerá simultáneamente en todos los filtros Doppler como ruido y hará el 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 guías 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



M.1464-04

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 cosintonizada 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 3.

CUADRO 3

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)
Pd 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 de frecuencias 2 700-2 900 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.

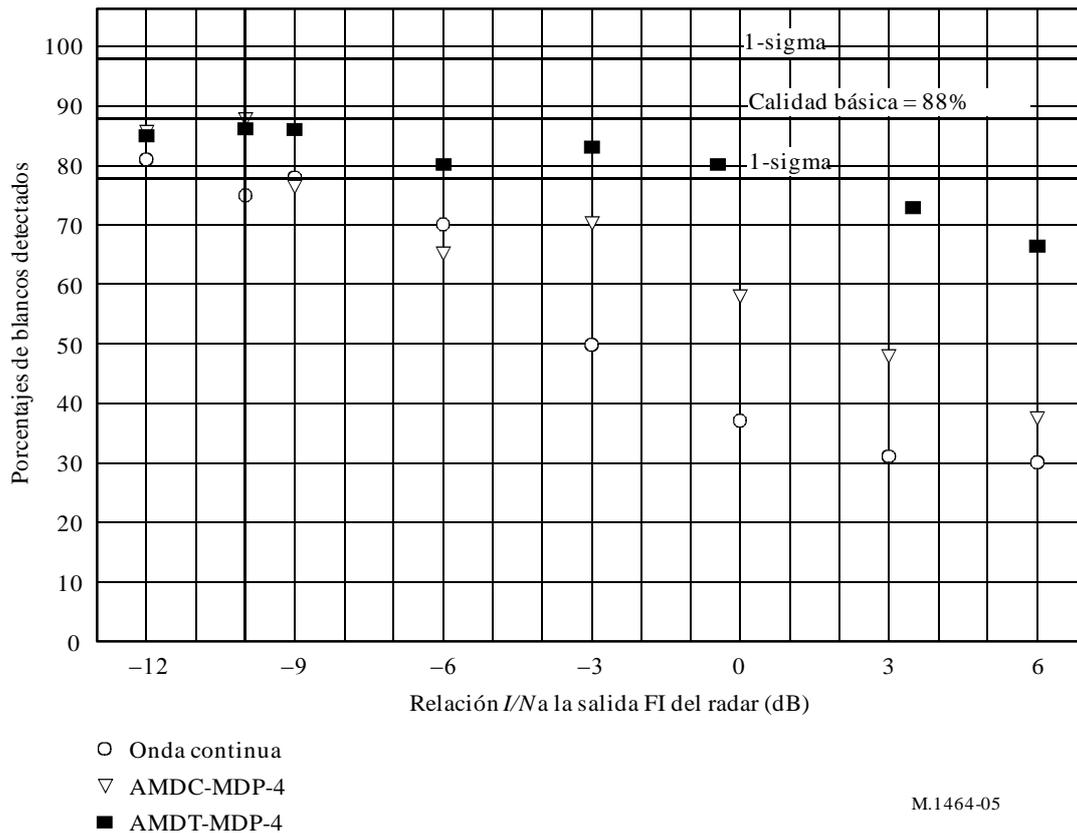
Para las pruebas del nivel básico (sin introducir en el radar interferencia) el radar tiene un valor medio de observación de 8,8 blancos por rotación, de los 10 blancos que se introducen por rotación. Se observaron en cada ensayo 20 rotaciones. La P_d de blancos básica real fue entonces de $175/200$, 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



M.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:

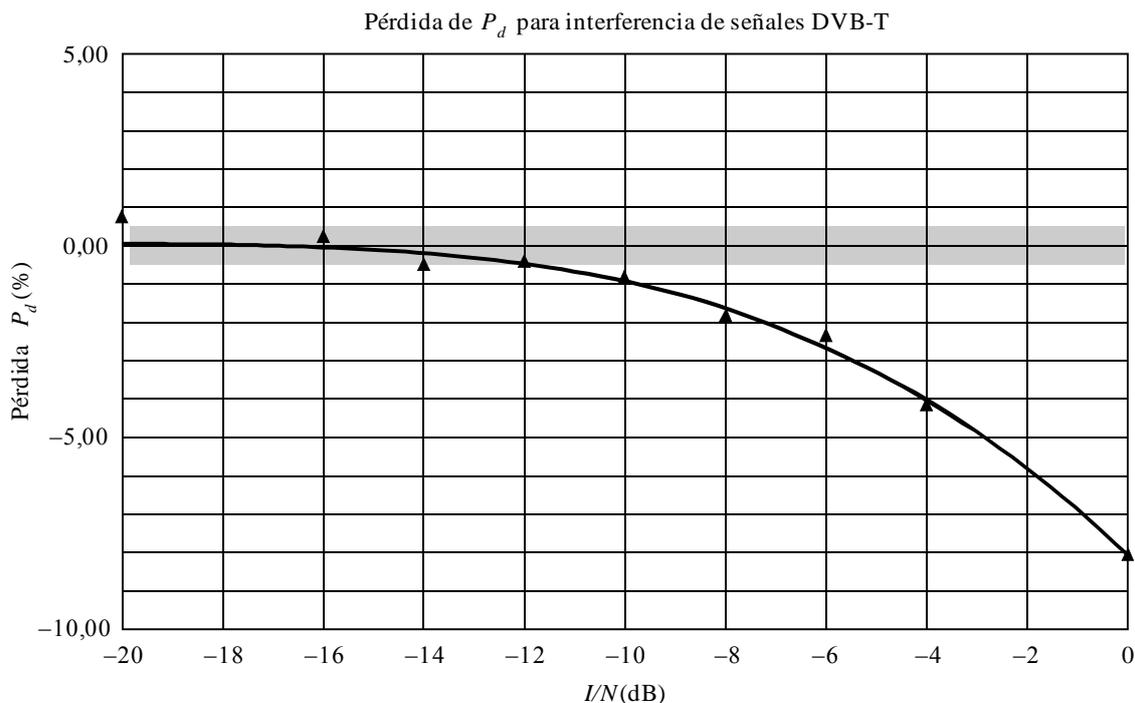
- sólo las aeronaves pequeñas (aviones de propulsión de la aviación general o militares) en vez de todas las aeronaves;
- niveles de vuelo bajos (especialmente largas distancias)

- 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) Salzburgo



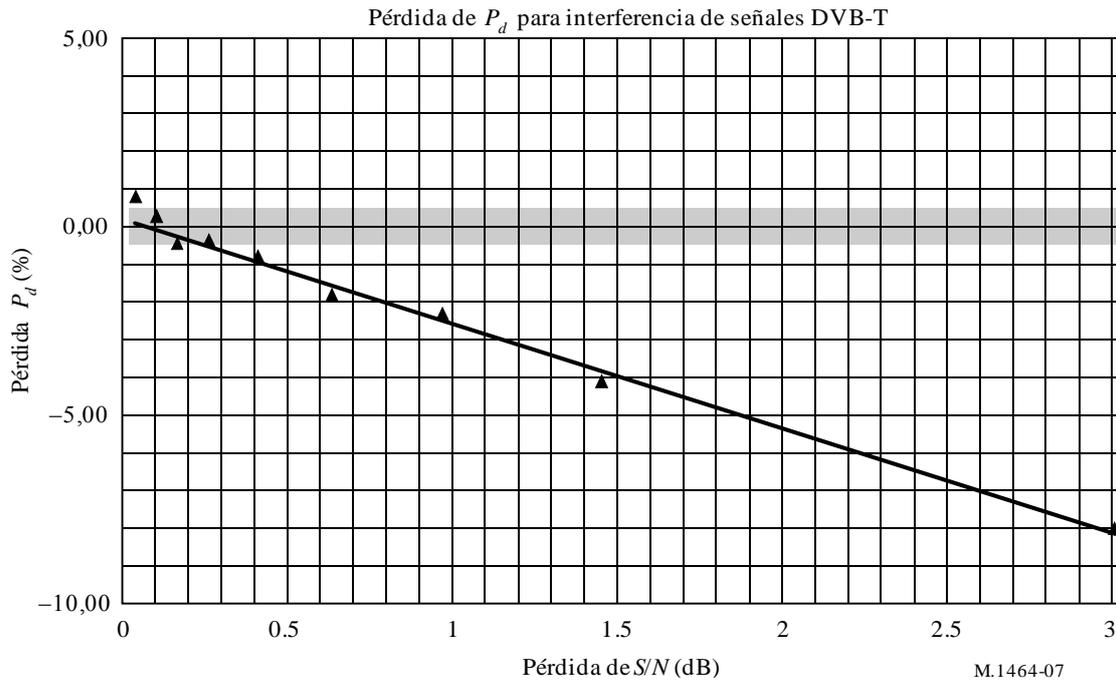
M.1464-06

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.

FIGURE 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



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 de frecuencias 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.