

INFORME UIT-R M.2050

Resultados de las pruebas que ilustran la susceptibilidad de los radares de radionavegación marítima a las emisiones procedentes de comunicaciones digitales y de sistemas por impulsos en las bandas 2 900-3 100 y 9 200-9 500 MHz

(2004)

1 Introducción

Se han realizado pruebas para evaluar los efectos que tienen las emisiones procedentes de sistemas de comunicaciones digitales en tres radares de radionavegación marítima que funcionan con una atribución primaria en la banda 2 900-3 100 MHz y en dos radares que funcionan con atribución primaria igualmente en la banda 9 200-9 500 MHz. Los radares son de tipo de radionavegación marítima con categoría de incorporación obligatoria SOLAS¹ de la Organización Marítima Internacional (OMI) que emplean velocidades de exploración, anchuras de impulso, frecuencias de repetición de impulsos, anchura de banda en FI, factor de ruido y anchuras de haz de antena típicos de los que se identifican en la Recomendación UIT-R M.1313. Estos radares son representativos de los tipos utilizados por la Guardia Costera de Estados Unidos de América para la navegación de embarcaciones, por la industria de fletes y también por las embarcaciones de recreo. Los radares que funcionan en la banda 2 900-3 100 MHz se identifican como Radares A, B y C en este Informe y los radares de la banda 9 200-9 500 MHz se identifican como Radares D y E.

Los radares de la Recomendación UIT-R M.1313 suelen emplear técnicas de reducción de la interferencia y métodos de procesamiento identificados en la Recomendación UIT-R M.1372 que les permiten funcionar en presencia de otros radares de radionavegación y de radiolocalización. Las técnicas de este tipo son muy eficaces para reducir o eliminar la interferencia impulsiva asíncrona de ciclo de trabajo reducido entre radares. Todos los radares que se probaron cuentan con algún tipo de circuitos/procesamiento para rechazo de la interferencia que estaban activos a menos que se indicase lo contrario. La Recomendación UIT-R M.1461 contiene criterios de protección para los radares que funcionan en el servicio de radiodeterminación.

Con estas pruebas se investigaba la eficacia de cada circuito o programa informático de supresión de interferencia del radar en la reducción o eliminación de la interferencia debida a las emisiones procedentes de un sistema de comunicaciones que emplee un esquema de modulación digital. También se realizaron otras pruebas utilizando emisiones por impulsos de ciclo de trabajo reducido como fuente de interferencia.

Las pruebas se efectuaron con la ayuda de los fabricantes del radar y de marinos expertos. Sus orientaciones sirvieron para configurar y hacer funcionar adecuadamente los radares.

Estas pruebas se llevaron a cabo con una generación de blancos no fluctuantes que se insertaron en los receptores de radar.

En este Informe se describen las operaciones que llevan a las conclusiones adoptadas hasta la fecha.

¹ Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar.

2 Objetivos

Los objetivos de las pruebas eran:

- cuantificar la capacidad de cada uno de los cinco sistemas de procesamiento de rechazo de la interferencia del radar de navegación marítima para reducir las emisiones no deseadas procedentes de sistemas de comunicaciones digital, en función de su nivel de potencia;
- elaborar criterios de protección en términos de la I/N para reducir los efectos de las emisiones de sistemas de comunicaciones digitales no deseadas en los radares de radionavegación marítima;
- observar y cuantificar la eficacia de cada una de las técnicas de rechazo de la interferencia en los radares de radionavegación marítima para reducir el número de blancos falsos y estrías radiales (estroboscópicas), y disminuir el ruido de fondo o «pecas».

3 Radares sometidos a prueba

3.1 Radar A

El Radar A de radionavegación marítima, que se introdujo hacia el año 2000 y se está aún perfeccionando, fue diseñado para aplicaciones comerciales y responde a una categoría de radar de la OMI que funciona en la banda 2 900-3 100 MHz. Los valores nominales de los parámetros principales de este radar se obtuvieron de los documentos de homologación reglamentaria, folletos comerciales y manuales técnicos. Dichos valores se resumen en el Cuadro 1.

CUADRO 1

Parámetros del transmisor y receptor del Radar A

Parámetro	Valor			
Frecuencia (MHz)	3 050 ± 30			
Potencia de impulsos (kW)	30			
Alcance (millas náuticas) (km)	0,375-1,5 0,7-2,8	3-6 5,6-11,1	12 22,2	24-96 44,5-177,8
Anchura de impulsos (µs)	0,08	0,30	0,60	1,2
Frecuencia de repetición de impulsos (Hz)	2 200		1 028	600
Anchura de banda en FI (MHz)	28	3	3	3
Rechazo de respuesta no esencial (dB)	60			
Factor de ruido del sistema (dB)	4			
Anchura de banda de RF (MHz)	Desconocida			
Velocidad de exploración de la antena (rpm)	26			
Tiempo de exploración de la antena (s)	2,31			
Anchura del haz horizontal de la antena (grados)	1,9			
Anchura del haz vertical de la antena (grados)	22			
Polarización	Horizontal			

El radar utiliza un amplificador/detector de FI logarítmico multietapa. Este tipo de diseño del receptor es muy común en los radares de radionavegación marítima que tienen que detectar blancos con señales de retorno muy pequeñas y muy grandes. Un amplificador logarítmico aumenta la gama de retornos de blanco que puede tratar el receptor del radar sin llegar a saturación.

Se midió el factor de ruido del radar viéndose que era de 5,3 dB, lo que está en línea con el valor nominal de 4 dB. La anchura de banda en FI a 3 dB es de unos 3 MHz para la escala de alcance utilizada en las pruebas. A partir de estos parámetros se calculó una potencia de ruido del receptor del radar de unos -104 dBm.

El Radar A cuenta con amplias capacidades de procesamiento de la señal y de seguimiento de blancos, incluyendo una función adaptable a nivel local de índice constante de alarmas falsas (CFAR) y una modalidad de correlación entre exploraciones. La función CFAR (que actúa en una pequeña fracción de un barrido de alcance) se conoce como CFAR de un orden estadístico, tipo que permite reducir o evitar el efecto de desensibilización de los impulsos interferentes. Ello se efectúa descartando un número seleccionable de muestras de señal de fondo que de no ser así se utilizarían para establecer el umbral de detección. En el proceso se descartan las muestras que tengan la amplitud máxima. A medida que se van descartando más muestras que contengan los impulsos interferentes de amplitud mayor, se reduce la probabilidad de su influencia en la sensibilidad de la detección de un blanco válido.

El Radar B también puede efectuar un proceso de correlación entre exploraciones, lo que ofrece un medio adicional para discriminar entre señales presentes de forma coherente, tales como un blanco válido, y señales que aparecen en instantes aleatorios, tales como una interferencia impulsiva asíncrona.

3.2 Radares B y D

Los Radares B y D son del tipo de radionavegación marítima de la OMI procedentes del mismo fabricante y concebidos para aplicaciones comerciales. El Radar B funciona en la banda 2 900-3 100 MHz y el Radar D en la banda 9 200-9 500 MHz. Los Radares B y D sitúan su transmisor/receptor debajo de la cubierta y utilizan un guíaondas para transmitir señales a la antena y recibir señales desde ésta. Emplean pasos de entrada de antena y de receptor diferentes, pero tienen una pantalla común, junto con elementos comunes del receptor, que incluyen los circuitos de procesamiento de rechazo de la interferencia y los de FI. Los radares utilizan un amplificador de FI logarítmico multietapa y un detector de vídeo separado. Los Radares B y D también utilizan la fluctuación de impulsos. Puede aplicarse una oscilación a la frecuencia de repetición de impulsos transmitidos para evitar ecos de ida y vuelta de segunda escala y también para reducir la interferencia procedente de otros transmisores situados en las proximidades. Esta función se establece automáticamente en el transceptor y proporciona hasta $\pm 25 \mu\text{s}$ de fluctuación respecto al valor nominal.

Los valores nominales de los parámetros principales de estos radares se obtuvieron de los documentos de homologación reglamentaria, folletos comerciales y manuales técnicos. Dichos valores se indican en el Cuadro 2.

CUADRO 2

Parámetros del transmisor y del receptor de los Radares B y D

Parámetro	Valor			
Frecuencia (MHz)	3 050 ± 10		9 410 ± 30	
Potencia de impulsos (kW)	30			
Alcance (millas náuticas)	0,125-1,5	3-24	48	96
Anchura de impulsos (µs)	0,070	0,175	0,85	1,0
Frecuencia de repetición de impulsos (Hz)	3 100	1 550	775	390
Anchura de banda en FI (MHz)	22	22	6	6
Rechazo de respuesta no esencial (dB)	Desconocido			
Factor de ruido del sistema (dB)	5,5			
Anchura de banda de RF (MHz)	Desconocida			
Velocidad de exploración de la antena (rpm)	24/48			
Anchura del haz horizontal de la antena (grados)	2,8		1,2	
Anchura del haz vertical de la antena (grados)	28		25	
Polarización	Horizontal			

Los valores de la anchura de impulsos y de la frecuencia de repetición de impulsos del Cuadro 2 son los valores por defecto para dicho alcance particular. El operador puede, en ciertos alcances, seleccionar otras anchuras de impulsos y frecuencias de repetición de impulsos que sean inferiores o superiores a los valores por defecto.

Los Radares B y D utilizan dispositivos de correlación entre impulsos y entre exploraciones para reducir la interferencia que pueda proceder de otros radares que funcionen en las proximidades. Para el dispositivo de correlación entre impulsos, los retornos se comparan entre un impulso y otro a fin de reducir la interferencia. Una señal se visualiza únicamente si está presente en dos impulsos consecutivos. Esta función de rechazo de la interferencia tiene su eficacia máxima si se ha ajustado el tranceptor para que proporcione una fluctuación en la frecuencia de repetición de impulsos. En el caso del dispositivo de correlación entre exploraciones, se visualiza únicamente un blanco si está presente en dos exploraciones consecutivas. Estos radares no cuentan con un procesamiento CFAR. En la Recomendación UIT-R M.1372 figura un análisis completo de estas técnicas de reducción de la interferencia en los radares.

3.3 Radares C y E

Los Radares C y E son del tipo de radionavegación marítima de la OMI procedentes del mismo fabricante y concebidos para aplicaciones comerciales. El Radar C funciona en la banda 2 900-3 100 MHz, y el Radar E en la banda 9 200-9 500 MHz. Los Radares C y E son de diseño de emplazamiento sobre torreta. El receptor/transmisor (R/T) va encapsulado en un recinto metálico situado directamente bajo la antena giratoria. La señal de vídeo procedente de la unidad R/T se envía a la pantalla situada bajo la cubierta, mediante cables. Estos radares utilizan pasos de entrada de antena y de receptor distintos, pero tienen una pantalla común junto con elementos comunes del receptor, que incluyen los circuitos de procesamiento de rechazo de la interferencia y los de FI. Ambos radares utilizan un amplificador/detector de FI logarítmico de aproximación sucesiva de ocho etapas.

Los valores nominales de los parámetros principales de estos radares se obtuvieron de los documentos de homologación reglamentaria, folletos comerciales y manuales técnicos. Dichos valores se indican en el Cuadro 3.

CUADRO 3

Parámetros del transmisor y del receptor de los Radares C y E

Parámetro	Valor		
Frecuencia (MHz)	3 050 ± 10	9 410 ± 30	
Potencia de impulsos (kW)	30		
Alcance (millas náuticas)	0,125-3	6-24	48-96
Anchura de impulsos (µs)	0,050	0,25	0,80
Frecuencia de repetición de impulsos (Hz)	1 800		785
Anchura de banda en FI (MHz)	20	20	3
Rechazo de respuesta no esencial (dB)	Desconocido		
Factor de ruido del sistema (dB)	4		
Anchura de banda de RF (MHz)	Desconocida		
Velocidad de exploración de la antena (rpm)	25/48		
Tiempo de exploración de la antena (s)	2,31		
Anchura del haz horizontal de la antena (grados)	2.0		
Anchura del haz vertical de la antena (grados)	30		
Polarización	Horizontal		

Los valores de la anchura de impulsos y de la frecuencia de repetición de impulsos del Cuadro 3 son los valores por defecto para dicho alcance particular. El operador puede, en ciertos alcances, seleccionar otras anchuras de impulsos y frecuencias de repetición de impulsos que sean inferiores o superiores a los valores por defecto.

Los Radares C y E utilizan dispositivos de correlación entre impulsos y entre exploraciones para reducir la interferencia causada por otros radares. Estas técnicas se describen en el § 3.2. Estos radares no disponen de procesamiento CFAR.

3.4 Monitores vídeo del radar

Gracias a sus capacidades mejoradas de procesamiento de señal, el Radar A puede mostrar diversos tipos de blancos en combinaciones diferentes. Puede mostrar «señales luminosas» de vídeo en bruto amorfo (conocida como monitor de imagen), blancos sintéticos que aparecen como una «o», y/o blancos rastreados que aparecen como una «x». El brillo de los blancos de la imagen de vídeo corresponde al nivel de la señal de retorno del blanco. Los blancos que tienen una «señal luminosa» más brillante tienen un mayor eco de retorno. Los blancos sintéticos requieren unos 2-3 dB de potencia deseada más que los blancos de vídeo en bruto para obtener la misma probabilidad de detección, Pd, cuando funcionan con el mismo nivel de señal detectable (MDS), pero su brillo no varía de manera proporcional a la intensidad de la señal reflejada.

Los Radares B y D (del mismo fabricante) utilizan un tubo de rayos catódicos (TRC) en color para mostrar los blancos e información de radar destinada al usuario tal como la frecuencia de repetición de impulsos, la anchura del impulso y los círculos de alcance y otros parámetros. Estos radares no muestran los blancos sintéticos y sólo muestran «señales luminosas» de vídeo en bruto. Asimismo,

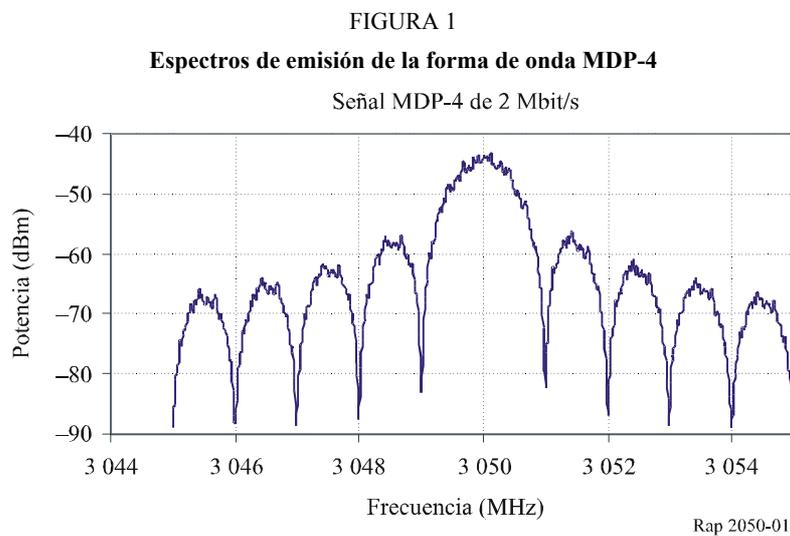
los Radares C y E (de otro fabricante) sólo muestran «señales luminosas» de vídeo en bruto. Ahora bien, el monitor utilizado en los Radares C y E es del tipo barrido «raster» monocromático. Además de los blancos, este monitor también indica diversos parámetros del radar. Al igual que el Radar A, en estos radares las «señales luminosas» de vídeo en bruto son más brillantes para los blancos que tienen mayor eco de retorno.

4 Señales indeseadas

El Radar A se probó con una fuente de interferencia que consistía en una onda con modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (MDP-4) de 2 Mbit/s. Los Radares B y C se probaron con fuentes de interferencia que consistían en señales con modulación de amplitud en cuadratura (MAQ) 64, MAQ-16, acceso múltiple por división de código 2000 (cdma2000) y AMDC (CDMA, *code division multiple access*) de banda ancha (AMDC-BA). Los Radares D y E sólo se probaron con señales cdma2000 y AMDC-BA. Todas las señales interferentes estaban sintonizadas con los radares. La señal MDP-4 que se aplicó al Radar A era continua, y abarcaba los 360° completos.

Las señales AMDC no deseadas que se aplicaron a los Radares B, C, D y E se sincronizaron con la generación del blanco dentro del mismo acimut. El intervalo de sincronización era igual al intervalo de tiempo que tendría una fuente de interferencia estacionaria dentro de una anchura de haz horizontal de 3 dB de la antena del radar en rotación. Las señales MAQ no se sincronizaron.

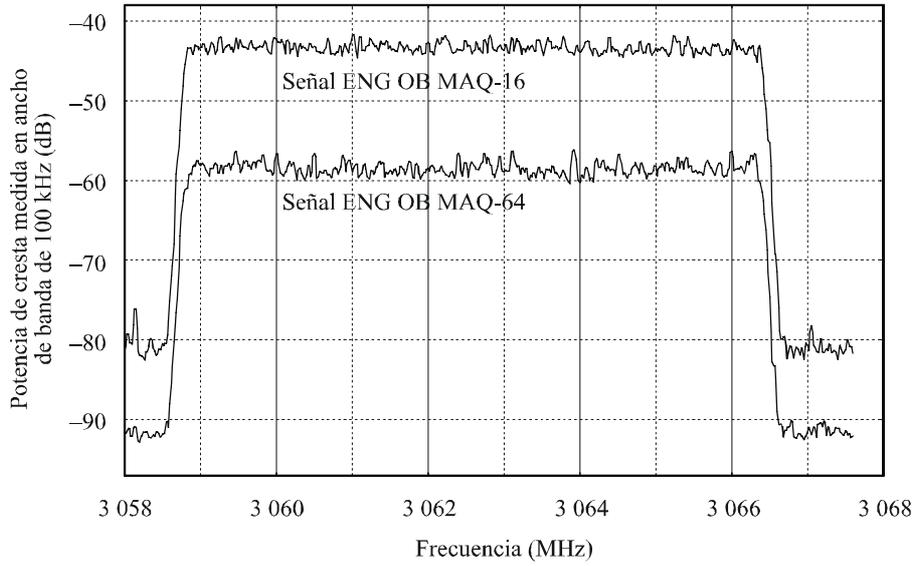
El espectro de emisión medido de la señal MDP-4 continua se muestra en la Fig. 1.



Se utilizaron aparatos de prueba de comunicaciones para generar las señales DVB-T MAQ-16, DVB-T MAQ-64, cdma2000 y AMDC-BA. En las Figs. 2 y 3 se muestran instantáneas del espectro para cada una de las señales no deseadas. La señal cdma2000 se aplicó para la norma de enlace inverso (móvil a base) de acuerdo con el formato IS-95 de teléfonos móviles celulares. La señal AMDC-BA se aplicó para la norma de enlace ascendente de acuerdo con el formato 3GPP 3.5.

Las señales DVB-T MAQ-16 y 64 de la Fig. 2 representan el tipo de modulación que emplean las cámaras digitales utilizadas para periodismo electrónico en exteriores (ENG OB).

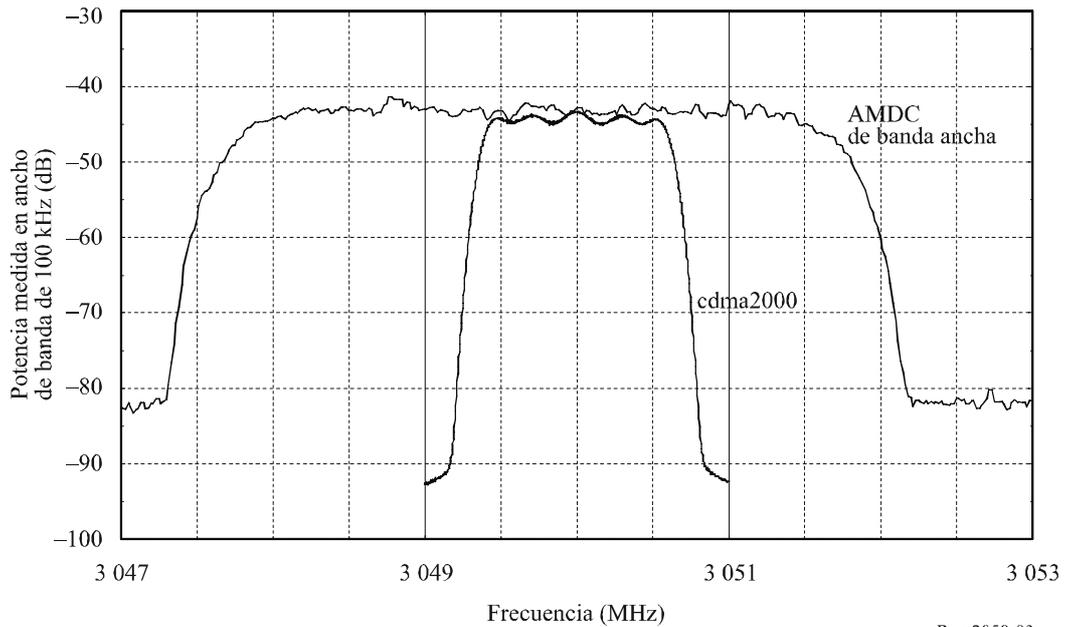
FIGURA 2
Señal MAQ empleada en ENG OB
Espectro de la señal ENG OB



Nota 1 – Las curvas espectrales se han desplazado en amplitud para que el gráfico seas más claro.

Rap 2050-02

FIGURA 3
Señales AMDC
Espectros de la señales AMDC de banda ancha y cdma2000



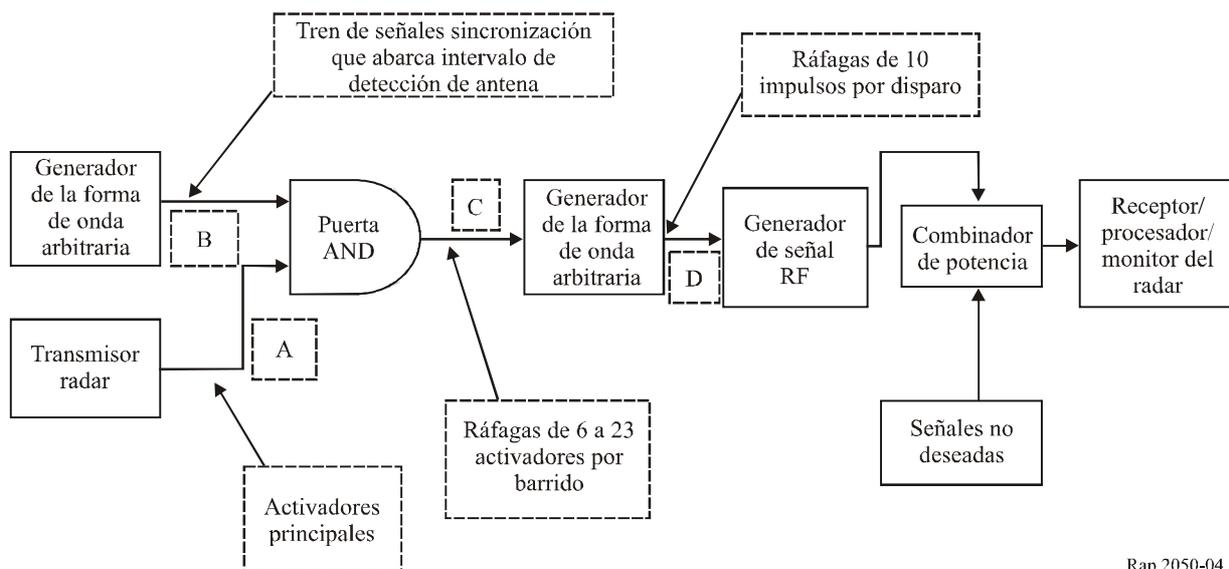
Rap 2050-03

5 Generación de blancos sin oscilaciones

Se generaron 10 blancos de igual amplitud y equidistantes simulados a lo largo de un radio utilizando generadores de señales de RF, generadores de formas de onda arbitrarias y diversos equipos de RF (combinadores, cableadores, atenuadores, etc.) para cada uno de los radares que funcionan con un alcance de 3 millas náuticas (5,6 km). El sistema de generación de blancos creó grupos de impulsos de RF de anchura y temporización adecuadas de modo que cuando se aplicaron en el receptor de radar los impulsos aparecían como 10 blancos separados en el monitor ppi (indicador de posición de los impulsos) del radar. Los 10 blancos eran equidistantes a lo largo de un radio de 3 millas náuticas de longitud. Los blancos en cada distancia dentro de ese radio de 3 millas náuticas tenían la misma potencia de señal en el receptor del radar. Esto simula los blancos cuya sección transversal aumenta con la distancia. El número de impulsos que se utilizaron para generar cada blanco dependía de la frecuencia de repetición de impulsos del radar, de la velocidad de rotación de la antena y de la anchura de haz horizontal de la antena. En la Fig. 4 se muestra la instrumentación utilizada para generar los blancos. El sistema de generación de blancos proporciona blancos sin oscilaciones: para cada distancia la sección transversal es constante.

FIGURA 4

Instrumentación del generador de blancos

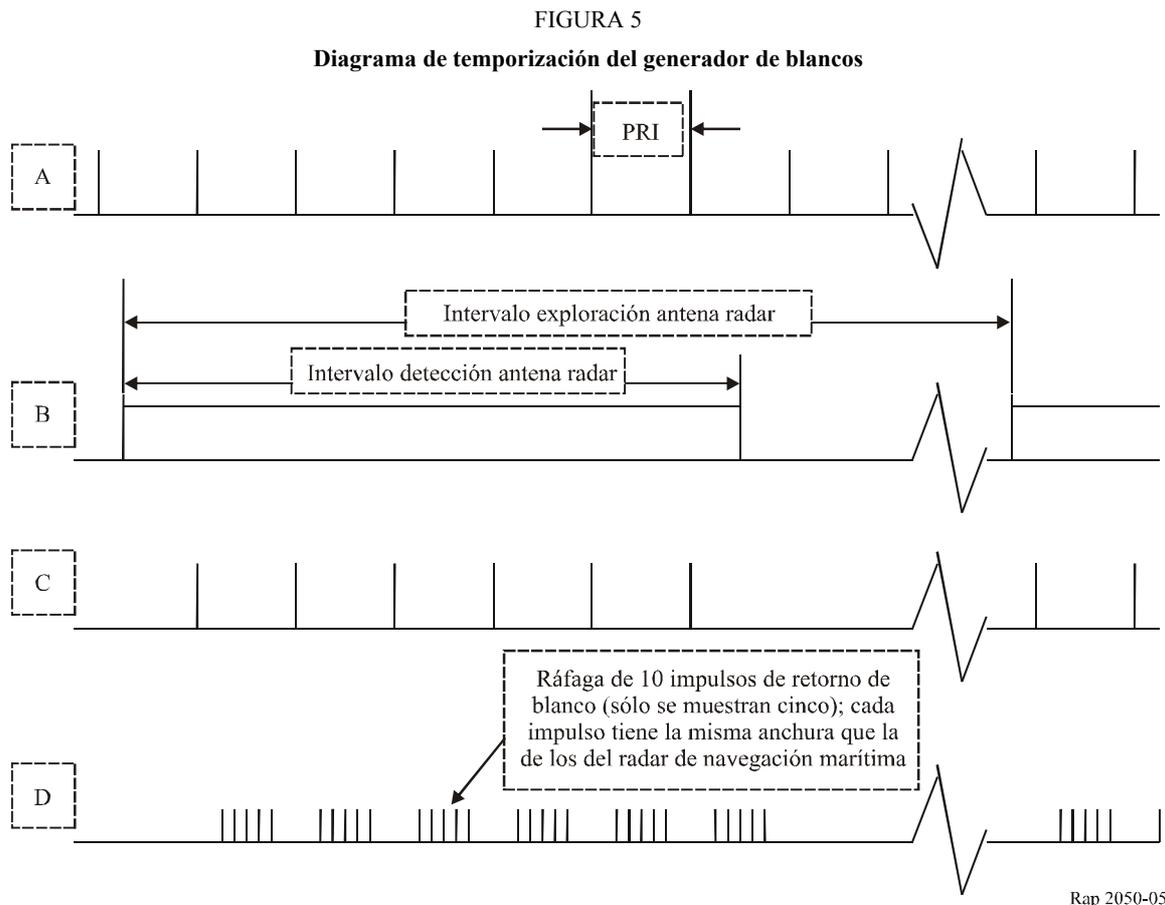


Rap 2050-04

Se utilizó el tren de impulsos de activación del transmisor (A) para activar el generador de blancos simulados. Se empleó un generador de impulsos de funcionamiento libre para generar impulsos sincronizados (B) que representan el efecto de la modulación en amplitud en el retorno del blanco debido al haz de la antena. Esos impulsos sincronizan el tren de activadores del transmisor en un circuito de puerta AND, generando ráfagas (C) de impulsos de activación que contienen entre 6 y 23 impulsos cada una. Cada impulso de activación se aplicó a un generador de forma de onda arbitraria, que retardó la activación adecuadamente y generó una ráfaga de 10 impulsos (D), cada uno de los cuales con una anchura igual a la de los impulsos cortos del radar. Estos 10 impulsos se aplican durante un mismo «barrido» del radar; es decir dentro de la parte mostrada de un intervalo de repetición de impulsos. Cada uno de estos impulsos modula, a su vez, a un generador de señales RF cuya frecuencia es de unos 3 050 ó 9 410 MHz a fin de generar un tren de impulsos de retorno de blanco simulado. La frecuencia específica del generador de señal de RF se ajustó para maximizar la respuesta del radar.

Los 10 impulsos de blanco emitidos por cada activador del radar se producen dentro del intervalo de retorno de una de las escalas de corto alcance del radar, es decir un «barrido». Por consiguiente, los impulsos simulan 10 blancos a lo largo del radio; es decir una sola marcación. Para ajustar las configuraciones del monitor, la potencia de RF del generador de blancos se ajustó a un nivel tal que los 10 blancos fueran visibles a lo largo del radio sobre el monitor ppi y de modo que los controles del vídeo del radar estén en posiciones representativas de funcionamiento normal.

La velocidad repetición de impulsos del generador de blancos (forma de onda B) se ajustó de modo que los blancos apareciesen en el mismo acimut en exploraciones consecutivas del ppi. En la Fig. 5 se muestra el diagrama de temporización del generador de blancos.



PRI: Intervalo de repetición de impulsos.

Los niveles de la señal de todos los blancos utilizados en las pruebas se ajustó para generar detecciones de blancos estacionarias coherentes con una probabilidad fija de detección, P_d del 90% aproximadamente. Se seleccionó una P_d de 90% para tener en cuenta que la P_d nunca puede ser del 100% debido a los efectos de la propagación, la interferencia y otros factores. La OMI no ha especificado, por el momento, una P_d mínima para los radares de radionavegación marinos. La norma de calidad de funcionamiento de la OMI² no especifica los tipos de blanco, la sección transversal del blanco del radar ni el alcance mínimo para detectarlos. La OMI está definiendo una P_d mínima para estos tipos de radares que podría publicarse en breve.

² Extracto de las Resoluciones de la OMI A222(VII), A278(VIII), A477(XII) para el equipo de radar que exige la Regla 12, del Capítulo 5 del Convenio OMI-SOLAS.

6 Condiciones de prueba

Las pruebas se realizaron con el siguiente conjunto de parámetros de los radares de radionavegación marítima que se muestran en el Cuadro 4.

CUADRO 4

Configuración de control del radar

Parámetro	Configuración
Control del intervalo de sensibilidad (STC)	Deshabilitado
Constante de tiempo rápida (FTC)	Deshabilitado (configuración por defecto)
Rechazo de interferencia (IR)	Activado (configuración por defecto)
Control automático de ganancia	Activado (configuración por defecto)
Imagen seleccionada del Radar A	Vídeo en bruto («imagen») y/o blancos sintéticos
Radar B, C, D, E	Vídeo en bruto
Escala del alcance	3 millas náuticas (5,6 km)

La activación para todos los radares del control de intervalo de sensibilidad (STC) y la constante de intervalo rápida (FTC) queda a la discreción del operador. El STC es una técnica para suprimir el eco del mar que consiste en atenuar fuertemente la señal recibida en un alcance corto y por un valor que disminuye al aumentar el alcance, sin atenuar los alcances largos. La FTC es una técnica para suprimir el eco debido a la lluvia diferenciando la señal recibida tras la detección de envolvente.

Para cada uno de los radares que se probaron, los valores de referencia de las funciones informáticas que controlan el brillo, el color y contraste del blanco y del fondo fueron determinados experimentalmente por los operadores de las pruebas, con la colaboración de los fabricantes y marineros profesionales que tienen experiencia en estos tipos de radares en barcos de diversos tamaños. Una vez determinados, estos valores se utilizaron en todo el programa de prueba de ese radar.

7 Procedimientos de prueba

Para cada radar probado, la potencia de RF de salida del sistema del generador de blancos se ajustó de modo que la Pd del blanco («señal luminosa») fuera de un 90 % aproximadamente sin la presencia de señales no deseadas, y con la configuración de referencia de la pantalla del ppi para visualizar el blanco y el fondo. En el Cuadro 5 se enumera la potencia del blanco de cada entrada de RF del radar que fue necesaria para obtener una Pd del 90 %. Una vez determinados, estos valores se utilizaron en todas las pruebas.

CUADRO 5

Niveles de potencia del blanco

Radar sometido a prueba	Potencia del blanco a la entrada de RF (antes del mezclador) para una Pd de 0,90 (dBm)
A	-90
B	-89
C	-77
D	-89
E	-86

Para los Radares A, C y E, los niveles adecuados de la potencia de señal no deseada que fueron necesarios para producir los niveles de I/N en los receptores del radar se determinaron mediante la potencia de ruido del receptor calculada y calibrada con respecto a la entrada del guiaoondas del receptor. La potencia de ruido del receptor se calculó a partir de la anchura de banda de FI y el factor de ruido. La diferencia de anchura de banda entre receptor del radar y las señales de prueba se tuvieron en cuenta al establecer los niveles I/N .

Los niveles adecuados de las potencias de la señal no deseada que fueron necesarios para producir los niveles I/N en los receptores de Radar B y D se determinaron supervisando con un analizador de espectro la salida de la circuitería de FI en un punto de prueba ubicado a la entrada del detector. El analizador de espectro se ajustó a intervalo cero y se midió y registró el valor de la potencia de ruido del receptor del radar en el punto de prueba de FI, sin que hubiera presente ninguna señal no deseada. A continuación se aplicó la señal no deseada a la entrada de RF del radar y se fue incrementando el nivel de potencia de esta señal no deseada hasta aumentar en 3 dB la potencia de ruido en el punto de prueba de FI. Un incremento de 3 dB en la potencia de ruido del receptor equivale a una I/N de 0 dB. Una vez determinado el valor de la señal no deseada que genera la I/N de 0 dB, los niveles de potencia de la señal no deseada que generan los otros valores de I/N se determina fácilmente. Los niveles de potencia de las señales no deseadas se controlaron mediante atenuadores graduales o el monitor del panel de control del aparato de prueba.

Para los radares B y D, se contó el número de blancos en cada radio para 50 rotaciones simuladas de la antena y para cada nivel I/N de cada tipo de señal no deseada. Se calculó la Pd dividiendo el número de blancos contados por el número total de blancos que fueron generados.

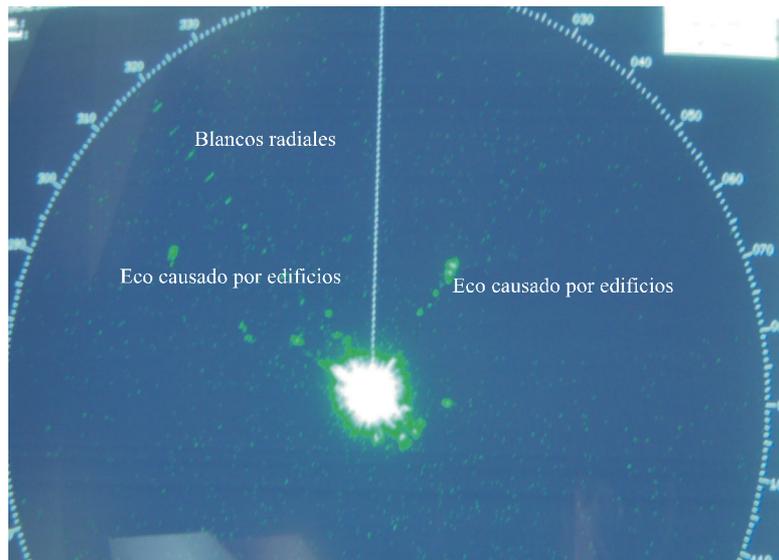
Para los Radares A, C y E, se observó y registró la intensidad o el brillo relativos de los blancos mostrados en el ppi para diversos niveles de I/N . La naturaleza del efecto de la interferencia sobre los monitores de los blancos de los Radares A, C y E impidió realizar un «cómputo» real de los blancos porque todos los blancos tendían a «desvanecerse» a la misma velocidad. Estos efectos son, entre otros, la «atenuación» de los blancos, el aumento del número de blancos falsos, las líneas radiales («luz estroboscópica»), y un aumento de ruido de fondo o «manchas».

8 Resultados de las pruebas

8.1 Radar A (3 GHz)

En la Fig. 6 se muestra una fotografía digital del indicador de la posición en el plano (ppi) del Radar A en estado de funcionamiento de referencia (sin introducir interferencia). Obsérvese que los blancos del vídeo en bruto aparecen a lo largo de un radio a unos 320°. El eco local causado por los edificios y las pequeñas manchas de ruido también son visibles en el monitor del radar.

FIGURA 6

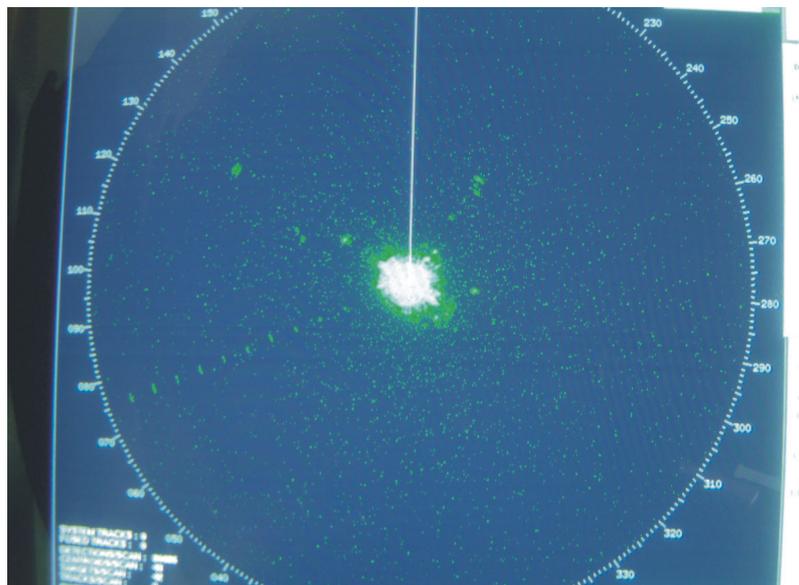
Estado de referencia del Radar A con blancos del vídeo

Rap 2050-06

Las observaciones de los blancos de la imagen del vídeo en el monitor ppi del radar se hicieron aplicando a su receptor emisiones del generador MDP-4. El nivel de potencia de la emisión MDP-4 se ajustó para que la apariencia del ppi del radar fuera igual a la de referencia.

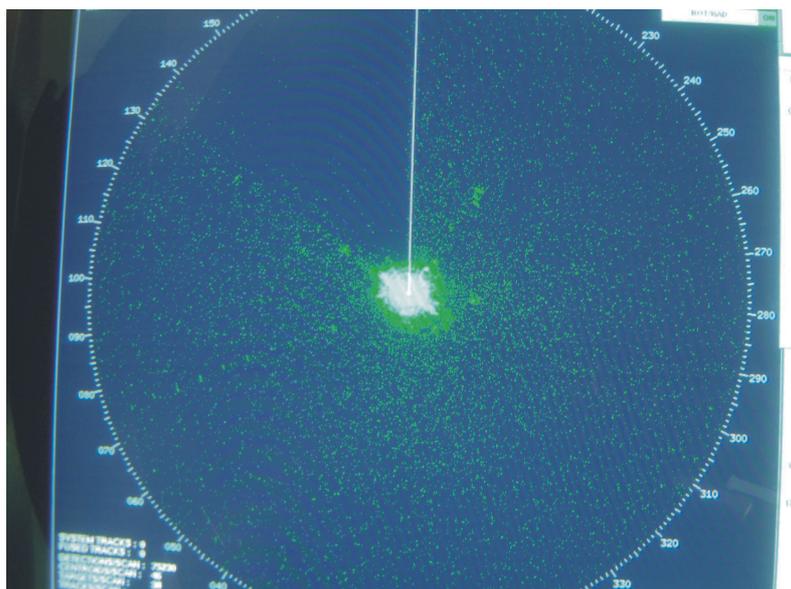
El nivel de potencia de la forma de onda MDP-4 se ajustó dentro de una gama de valores a fin de determinar el nivel en el que las emisiones MDP-4 no afectaban negativamente a la calidad de funcionamiento del radar al mostrar los blancos del vídeo. Las Figs. 7 y 8 son fotografías del ppi del radar que muestran los efectos de la forma de onda MDP-4 en los niveles de potencia -112 y -102 dBm (medidos en un ancho de banda de 3 MHz), respectivamente. La potencia de ruido del receptor del radar es de -104 dBm aproximadamente. Las relaciones I/N resultantes son -8 y $+2$ dB.

FIGURA 7

Interferencia MDP-4 para $I/N = -8$ dB

Rap 2050-07

FIGURA 8
Interferencia MDP-4 para $I/N = +2$ dB



Rap 2050-08

Las fotografías muestran que las emisiones MDP-4 causaron un aumento del ruido de fondo o manchas. Al comparar la Fig. 6, que es el estado de referencia del radar sin interferencias, con la Fig. 7 (cuya I/N es de -8 dB) se observa que han aumentado las manchas en el fondo pero los blancos todavía pueden detectarse y visualizarse. En la Fig. 8 la I/N es $+2$ dB y las emisiones MDP-4 han aumentado el ruido de fondo hasta el punto de que algunos de los blancos son indistinguibles de las manchas.

El nivel de potencia de ruido de las emisiones MDP-4 se ajustó para determinar el punto en el que los blancos del vídeo todavía eran claramente visibles y las «manchas» del fondo eran similares al nivel de referencia. El nivel de potencia determinado fue de -111 dBm aproximadamente a la entrada del receptor, para una relación I/N de unos -7 dB.

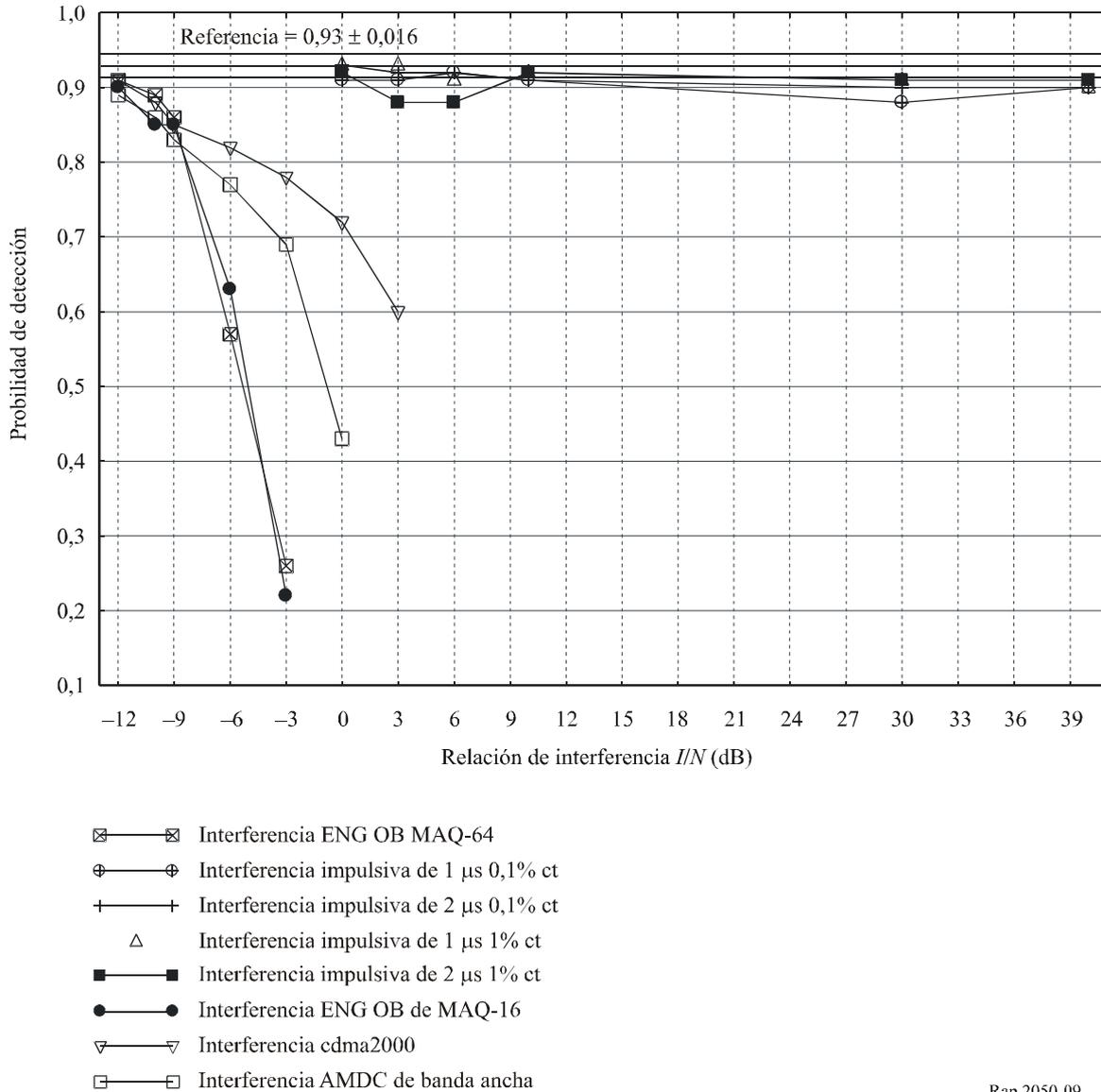
Es importante observar que los blancos de prueba en el radio son más visibles que los blancos «reales» que podrían aparecer en cualquier lugar del ppi del radar. Por consiguiente, se debe poner mucho cuidado al interpretar las imágenes del radar en presencia de ruido.

Los valores I/N no se basaron en una fotografía específica. Las fotografías en ese informe son representativas de una condición de interferencia. Algunas de las exploraciones del radar podían mostrar un estado peor (una mayor densidad de manchas/blancos falsos) mientras que en otros podría ser mejor (un ppi más claro) con el mismo nivel de I/N . Para elegir los valores I/N representados en las Figs. 6 a 8 se observaron aproximadamente 20 exploraciones en cada nivel I/N .

8.2 Radar B (3 GHz)

Para el Radar B fue posible observar los efectos de las señales no deseadas en cada uno de los blancos. Para cada señal no deseada, fue posible cuantificar la disminución del número de blancos visibles en el ppi al aumentar el nivel de I/N . Se contaron los blancos para cada nivel I/N y para cada tipo de interferencia. El cómputo de la Pd del blanco de referencia se realizó antes de comenzar cada prueba. Los resultados de las pruebas del Radar C se muestran en la Fig. 9, que representa la Pd de los blancos en función del nivel de I/N para cada tipo de interferencia. En la Fig. 9 la Pd de referencia es 0,93 con barras de error 1-sigma de 0,016 por encima y por debajo de ese valor. Obsérvese que cada punto en la Fig. 9 representa un total de 500 blancos deseados.

FIGURA 9
Curvas de Pd del Radar B
Radar B



En la Fig. 9 puede verse que, salvo en el caso de la interferencia impulsiva, la Pd del blanco cayó por debajo de la Pd de referencia utilizada en estas pruebas un valor igual a la desviación típica para valores de I/N por encima de -12 dB en todas las señales no deseadas que emplean modulación digital. La interferencia MAQ causó la caída más abrupta de la Pd al aumentar I/N . No se tomaron datos para los valores de I/N superiores a -3 dB para MAQ porque por encima de dicho nivel todos los blancos habían desaparecido del ppi. La interferencia cdma2000 es la que menos afectó a la Pd del blanco, aun cuando también causó una caída en la Pd a valores de I/N mayores que -12 dB.

8.3 Radar C (3 GHz)

Para el Radar C resultó difícil cuantificar la disminución de la Pd de los blancos a medida que se aplicaba interferencia al receptor del radar. La interferencia causó el desvanecimiento de todos los blancos a la misma velocidad, independientemente de cuál fuera su posición en la línea en la que se encuentran los blancos. No fue posible hacer desaparecer los blancos por separado aumentando la

potencia de interferencia, ni contar el número de blancos perdidos a fin de calcular la Pd. Por consiguiente, los datos tomados del Radar C indican si la aparición o no de todos los blancos se vio afectada en cada nivel de I/N para cada tipo de interferencia. Los datos correspondientes al Radar C se resumen en los Cuadros 6 y 7.

CUADRO 6

Radar C con interferencia ENG OB continua

Relación I/N (dB)	MAQ-64	MAQ-16
-12	Sin efecto	Sin efecto
-10	Sin efecto	Sin efecto
-9	Blancos ligeramente debilitados	Blancos ligeramente debilitados
-6	Blancos debilitados	Blancos debilitados
-3	Blancos invisibles	Blancos invisibles
0	Blancos invisibles	Blancos invisibles
3	Blancos invisibles	Blancos invisibles
6	Blancos invisibles	Blancos invisibles

Los datos en el Cuadro 7 muestran que, en el Radar E, las señales MAQ no deseadas afectaron la visibilidad de los blancos en su ppi para un nivel de I/N de -9 dB. A ese nivel, el brillo de los blancos sobre el ppi se debilitó ligeramente con respecto a su estado de referencia. Para niveles de I/N de -6 dB se debilitaron aún más y para todos los niveles de I/N por encima de -3 dB los blancos se debilitaron tanto que ya no eran visibles en el ppi.

CUADRO 7

Radar C con interferencia AMDC sincronizada

Relación I/N (dB)	AMDC-BA	cdma2000
-12	Sin efecto	Sin efecto
-10	Sin efecto	Sin efecto
-9	Sin efecto	Sin efecto
-6	Blancos debilitados	Blancos debilitados
-3	Blancos invisibles	Blancos invisibles
0	Blancos invisibles	Blancos invisibles
3	Blancos invisibles	Blancos invisibles
6	Blancos invisibles	Blancos invisibles

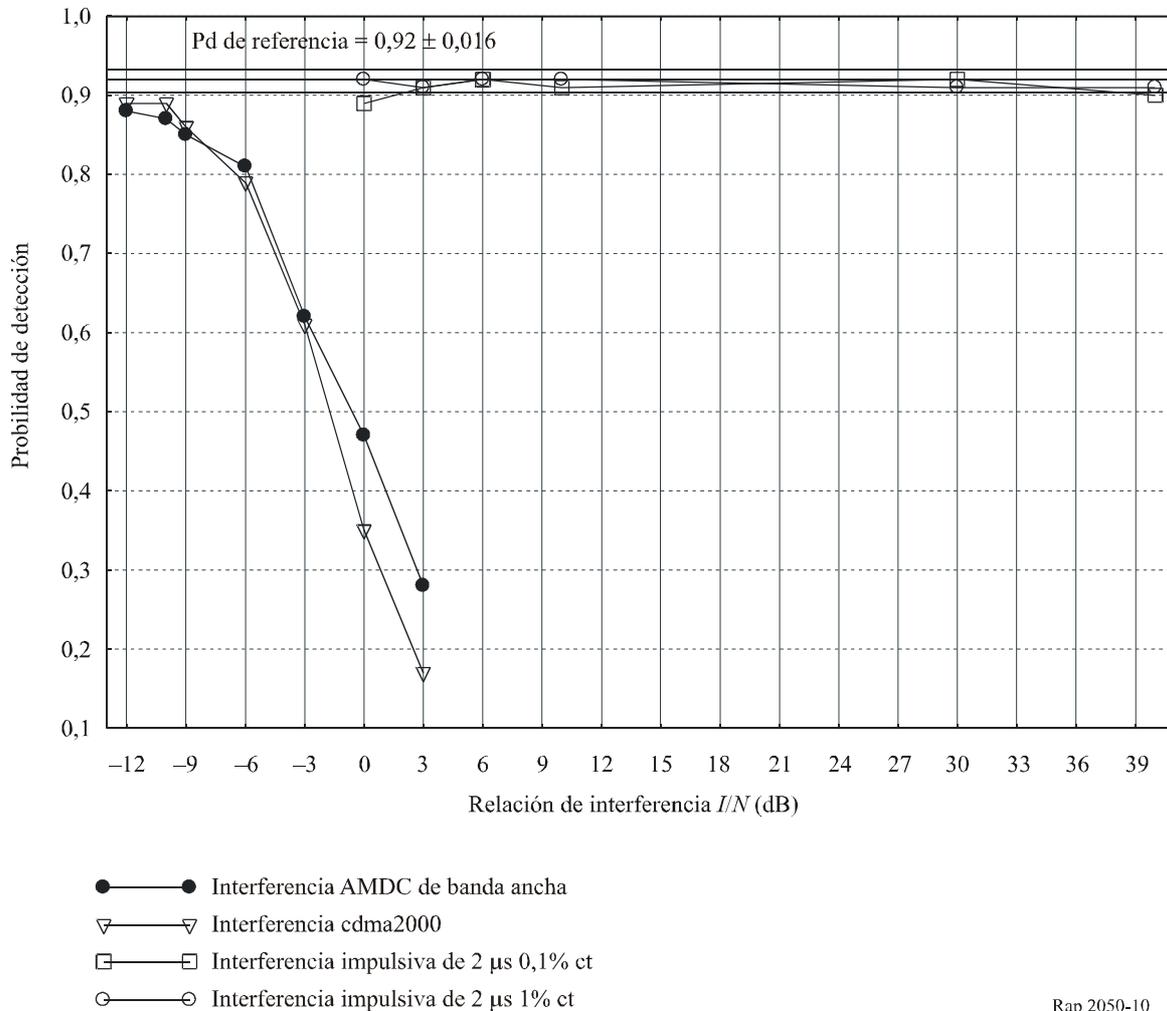
Los datos en el Cuadro 6 muestran que, en el Radar C, las señales AMDC no deseadas afectaron la visibilidad de los blancos en el ppi para un nivel de I/N de -6 dB. A ese nivel, el brillo de los blancos en el ppi se había debilitado considerablemente con respecto a su estado de referencia. Para niveles I/N de -3 dB y superiores, los blancos se debilitaron tanto que ya no eran visibles en el ppi.

En el Radar C, la interferencia impulsiva de 2,0 μ s y 1,0 μ s con ciclos de trabajo de 0,1 y 1,0% no afectó la visibilidad de los blancos en el ppi al nivel más alto de I/N , a saber, 40 dB.

8.4 Radar D (9 GHz)

Para el Radar D fue posible observar el efecto que las señales no deseadas tuvieron en cada blanco. Para cada señal no deseada, fue posible cuantificar la disminución del número de blancos a medida que se aumentaba el nivel de I/N . Se realizó un cómputo de blancos en cada nivel de I/N y para cada tipo de interferencia. El cómputo de la Pd del blanco de referencia se llevó a cabo antes de comenzar cada prueba. Los resultados de las pruebas del Radar D se muestran en la Fig. 10, que representa la Pd de los blancos en función del nivel de I/N para cada tipo de interferencia. La referencia está a una Pd de 0,92 con barras de error 1-sigma de 0,016 por encima y por debajo de ese valor. Obsérvese que cada punto en la Fig. 10 representa un total de 500 blancos deseados.

FIGURA 10
Curvas de Pd del Radar D
Radar D



Rap 2050-10

En la Fig. 10 se muestra que, salvo para el caso de la interferencia impulsiva, la Pd de blanco cayó por debajo de la Pd de referencia utilizada en estas pruebas un valor igual a la desviación típica para valores de I/N superiores a -12 dB de la señal AMDC no deseada.

8.5 Radar E (9 GHz)

Al igual que en el caso del Radar C, para el Radar E fue difícil cuantificar la disminución de la Pd de los blancos al aplicar interferencia al receptor del radar. La interferencia causó el desvanecimiento de todos los blancos a la misma velocidad independientemente de que estuvieran en la línea que forman los blancos. No fue posible hacer desaparecer cada blanco por separado aumentando la potencia de interferencia. Por consiguiente, los datos tomados del Radar C indican si la aparición o no de todos los blancos se vio afectada o no en cada nivel de I/N . Los datos correspondientes al Radar E se resumen en el Cuadro 8 que figura a continuación.

CUADRO 8

Radar E con interferencia AMDC sincronizada

Relación I/N (dB)	AMDC-BA	cdma2000
-12	Sin efecto	Sin efecto
-10	Sin efecto	Sin efecto
-9	Sin efecto	Sin efecto
-6	Blancos debilitados	Blancos debilitados
-3	Blancos debilitados	Blancos debilitados
0	Blancos invisibles	Blancos invisibles
3	Blancos invisibles	Blancos invisibles
6	Blancos invisibles	Blancos invisibles

Los datos del Cuadro 8 muestran que las señales AMDC no deseadas afectaron la visibilidad de los blancos para el Radar E en su ppi para un nivel de I/N de -6 dB. A ese nivel, el brillo de los blancos en el ppi se debilitó considerablemente con respecto a su estado de referencia. Para niveles de I/N de 0 dB superiores, los blancos se debilitaron tanto que ya no eran visibles en el ppi.

Para el Radar E, la interferencia impulsiva de 2,0 μ s y 1,0 μ s con ciclos de trabajo de 0,1 y 1,0% no afectó la visibilidad de los blancos en el ppi al nivel más alto de I/N , a saber 40 dB.

9 Conclusiones

Los resultados de estas pruebas demuestran que cuando las emisiones de los dispositivos que emplean modulación digital apuntan hacia un radar del tipo de los probados en este documento con una relación I/N de -6 dB, en algunos de los radares los blancos comienzan a debilitarse, a perderse o a aparecer blancos falsos. En otros radares, los efectos a este nivel de I/N ya se hubieran manifestado. Cuando se emplean radares con un amplificador/detector de FI logarítmico (Radares A, C y E), los blancos no eran visibles o se habían debilitado para niveles de I/N de -3 dB y -6 dB, como se indica en los Cuadros 6, 7 y 8. Dependiendo del tipo de interferencia acoplada en los Radares A, C y E, los efectos de la interferencia se maximizaron (es decir, los blancos habían desaparecido del ppi y no eran visibles los demás efectos) para niveles de I/N entre 0 y -10 dB. En los Radares B y D (que utilizan un amplificador logarítmico y un detector de vídeo independiente) para un nivel de I/N de -6 dB, las Pd de los blancos cayeron por debajo del error 1-sigma de referencia. Estos resultados muestran que con una relación I/N de -10 dB, los blancos en los Radares A, C y E no se debilitan más, y que los blancos en los Radares B y D las Pd son ligeramente inferiores al error de 1-sigma de referencia. Ahora bien, como se observa en el § 3.4, para el Radar A los blancos sintéticos requieren unos 2 a 3 dB de potencia de señal deseada más que

los blancos de vídeo en bruto para obtener la misma probabilidad de detección, P_d , cuando funcionan a un nivel mínimo de la señal detectable, pero la apariencia de los blancos no tenía más brillo en el ppi.

Las pruebas muestran que los radares pueden soportar interferencia impulsiva con un ciclo de trabajo pequeño a niveles altos de I/N gracias a que incorporan circuitería y/o procesamiento de señales que reducen la interferencia entre radares. Las técnicas de reducción de la interferencia entre radares basada en dispositivos de correlación entre exploraciones y entre impulsos y el procesamiento CFAR, descritos en la Recomendación UIT-R M.1372, han demostrado funcionar bastante bien. Sin embargo, estas mismas técnicas no sirven para disminuir las emisiones continuas que aparecen como ruido o como onda continua en el receptor del radar.

Dado que la mayoría de los radares marinos en las bandas 2 900-3 100 MHz y 9 200-9 500 MHz tienen un diseño y un funcionamiento muy similar, no parece probable que haya una gran diferencia entre los criterios de protección para éstos y los criterios que se obtuvieron de los radares utilizados en estas pruebas. Por consiguiente, estos resultados de las pruebas deben aplicarse a otros radares similares que funcionan en las bandas 2 900-3 100 MHz y 9 200-9 500 MHz.

La determinación de la cantidad de interferencia aceptable para estos tipos de radares puede ser muy subjetiva, pues depende de la agudeza visual y la experiencia del operador del radar que observa el ppi y cuenta los blancos y la graduación del brillo de los propios blancos. Sin embargo, debido al diseño del radar, no hay otra manera de llevar a cabo estas pruebas que la de un observador/verificador que observe los blancos en el ppi del radar.

La experiencia que estos operadores tienen con radares es un factor a tener en cuenta al observar la ppi y determinar exactamente qué es un blanco y cuánta degradación puede soportarse. Un operador de radar cualificado y con experiencia será capaz de discernir los blancos reales de los falsos, de la interferencia y/o la densidad mejor que otros sin experiencia. Para ser testigos y participar en estas pruebas, los fabricantes enviaron a ingenieros de diseño de radar y operadores e instructores de radar experimentados del Organismo de Guardacostas Marítima (MCA, *Maritime Coast Guard Agency*) del Reino Unido. Los resultados y conclusiones de estas pruebas fueron verificados por ellos.

Las conclusiones anteriores se basan en pruebas de blancos sin oscilaciones. En otro tipo de pruebas, en la que podrían incluirse blancos con oscilaciones, los resultados podrían diferir de éstos y por consiguiente las conclusiones podrían ser distintas.
