

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R M.1177-4
(04/2011)

**Técnicas para la medición de emisiones
no deseadas en los sistemas de radar**

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	Radio astronomía
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, 2011

© UIT 2011

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.1177-4*

**Técnicas para la medición de emisiones no deseadas
en los sistemas de radar**

(Cuestión UIT-R 202/5)

(1995-1997-2000-2003-2011)

Cometido

La presente Recomendación describe dos técnicas para la medición de emisiones radiadas no deseadas de radar. Se debe utilizar para medir las emisiones de dominio no esencial y comprobar la potencia de emisión respecto de los límites especificados en el Apéndice 3 (Sección II) al Reglamento de Radiocomunicaciones (RR), o para medir el nivel de emisiones no deseadas que caen dentro del dominio fuera de banda.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que las estaciones de radar fijas y móviles del servicio de radiodeterminación utilizan ampliamente bandas adyacentes a las empleadas por otros servicios y tienen una relación armónica con los mismos;
- b) que las estaciones de otros servicios son vulnerables a la interferencia causada por emisiones no deseadas con elevado nivel de potencia de cresta procedentes de las estaciones de radar;
- c) que muchos servicios han adoptado o han previsto adoptar sistemas de modulación digital que son más susceptibles a la interferencia provocada por las emisiones no deseadas del radar;
- d) que en las condiciones indicadas en los *considerando* a) a c), la interferencia a estaciones de otros servicios puede proceder de una estación de radar con emisiones no deseadas de elevado nivel de potencia de cresta;
- e) que la Recomendación UIT-R SM.329 especifica los valores máximos de las emisiones no deseadas en el dominio de emisiones no esenciales procedentes de transmisores radioeléctricos;
- f) que la Recomendación UIT-R SM.1541 especifica los límites genéricos para las emisiones no deseadas en el dominio fuera de banda,

recomienda

- 1** que se utilicen las técnicas de medición descritas en el Anexo 1 para estimar la cuantificación de los niveles de emisiones radiadas no deseadas procedentes de estaciones de radar que funcionan por encima de 400 MHz;
- 2** que se utilicen las mediciones técnicas descritas en los Anexos 1 ó 2, según sea apropiado, en base al diseño del radar, para orientar la medición de los niveles de emisiones radiadas no deseadas de las estaciones de radar que funcionan entre 50 MHz y 400 MHz;

* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de la Organización Marítima Internacional (OMI), de la Organización de la Aviación Civil Internacional (OACI), del Comité Internacional Radiomarítimo (CIRM), de la Organización Mundial de Meteorología (OMM) y de las Comisiones de Estudio de Radiocomunicaciones 1 y 4.

3 que se utilicen las técnicas de medición descritas en el Anexo 2 para estimar la cuantificación de niveles de las emisiones radiadas no deseadas de estaciones de radar que funcionan por debajo de 50 MHz.

Anexo 1

Medición de emisiones no deseadas de sistemas de radar según se indica en los *recomienda 1 y 2*

1 Introducción

Se describen estas dos técnicas, denominadas método directo y método indirecto.

Se recomienda el método de medición directo que mide las emisiones no deseadas procedentes de todos los radares, incluidos los que excluyen la realización de mediciones en puntos intermedios dentro de los transmisores de radar. Ejemplos de tales radares son los que utilizan redes de transmisores distribuidos incorporados en la estructura de antena, o que comprenden dicha estructura.

El método indirecto mide los componentes del radar por separado y a continuación combina los resultados. La división recomendada del radar es separar el sistema después de la junta giratoria (Ro-Jo, *Rotating Joint*), midiendo de esa forma el espectro de salida del transmisor en el acceso de salida de dicha junta y combinando el resultado con las características de ganancia de antena medidas.

2 Anchura de banda de referencia

Para los sistemas de radar, la anchura de banda de referencia, B_{ref} , utilizada para definir los límites de emisiones no deseadas (Recomendaciones UIT-R SM.329, UIT-R SM.1541 y el Apéndice 3 al Reglamento de Radiocomunicaciones (RR)) se debe calcular para cada sistema de radar. Para los cuatro tipos generales de modulación de impulsos del radar utilizados para radionavegación, radiolocalización, adquisición, seguimiento y otras funciones de radiodeterminación, los valores de la anchura de banda de referencia se obtienen utilizando las siguientes fórmulas:

- para radares sin codificación por impulsos de frecuencia fija, se divide uno por la longitud de impulsos del radar, (s) (por ejemplo, si la longitud de impulsos del radar es 1 μ s, la anchura de banda de referencia es $1/1 \mu\text{s} = 1 \text{ MHz}$);
- para radares de impulsos codificados en fase de frecuencia fija, se divide por la longitud de segmento (chip) codificado en fase, (s) (por ejemplo, si la longitud del segmento codificado en fase es 2 μ s, la anchura de banda de referencia es $1/2 \mu\text{s} = 500 \text{ kHz}$);
- para radares de barrido de frecuencia (MF) o de chirrido (chirp), la raíz cuadrada de la cantidad obtenida dividiendo la anchura de banda del chirrido (MHz) por la longitud del impulso, (μ s) (por ejemplo, si la MF está comprendida entre 1250 MHz y 1280 MHz o 30 MHz durante el impulso de 10 μ s, la anchura de banda de referencia es $(30 \text{ MHz}/10 \mu\text{s})^{1/2} = 1,73 \text{ MHz}$);
- para radares que funcionan con múltiples formas de onda, la anchura de banda de referencia se determina empíricamente a partir de las observaciones de la emisión del radar. La observación empírica se hace como sigue: El receptor del sistema de medición se sintoniza con una de las frecuencias fundamentales del radar, o se sintoniza con la frecuencia central dentro de la gama de chirrido del radar. La anchura de banda del sistema de medición se

fija al mayor valor disponible, y se registra el nivel de potencia recibido del radar en esta anchura de banda. La anchura de banda de medición se reduce después progresivamente, y el nivel de potencia recibido se registra en función de la anchura de banda. El resultado final es un gráfico o tabla que muestra la potencia medida en función de la anchura de banda del sistema de medición. La anchura de banda requerida es la más pequeña en la cual se observa aún el nivel de potencia total y la anchura de banda de referencia se puede calcular a partir del conocimiento de la respuesta de impulsos del receptor de medición que utiliza el factor de relación de la anchura de banda de medición (MBR, *measurement bandwidth ratio*), como se describe a continuación. Si se observa inmediatamente una reducción del nivel de potencia, se debe utilizar la mayor anchura de banda disponible.

En todos los casos, cuando las anchuras de banda son superiores a 1 MHz, se debe utilizar una anchura de banda de referencia, B_{ref} , de 1 MHz.

3 Anchura de banda de medición y parámetros del detector

La anchura de banda de medición, B_m , se define como la anchura de banda de impulsos del receptor y es mayor que la anchura de banda de FI, B_{fi} (algunas veces denominada anchura de banda de resolución para analizadores de espectro). La anchura de banda de medición, B_m , se puede obtener de la siguiente ecuación:

$$B_m = B_{fi} \times MBR$$

Es necesario determinar la MBR para el receptor de medición que se utiliza. La MBR es aproximadamente 3/2 para un filtro gaussiano de anchura de banda de FI de -3 dB que se suele utilizar en muchos receptores de analizadores de espectro comerciales. (Obsérvese que en algunos instrumentos la anchura de banda de FI se define en el punto de -6 dB).

Se debe seleccionar una anchura de banda de FI de receptor apropiado para que dé una de las siguientes anchuras de banda de medición recomendadas.

- MBR B_m ¹
- ≤ (1/ T) para radares sin codificación de impulsos de frecuencia fija, T es la longitud del impulso. (Por ejemplo, si la longitud del impulso del radar es 1 μ s, la anchura de banda de medición debe ser ≤ 1/(1 μ s) = 1 MHz.)
 - ≤ (1/ t) para radares de impulsos codificados en fase de frecuencia fija, t es la longitud del segmento codificado en fase. (Por ejemplo, si un radar transmite impulsos de 26 μ s, cada uno de ellos consistente en 13 segmentos codificados en fase de 2 μ s de longitud, la anchura de banda de FI de medición debe ser ≤ 1/(2 μ s) = 500 kHz).
 - ≤ ((B_c/T)^{1/2}) para radares de barrido de frecuencia (MF, o de chirrido), B_c es la gama del barrido de frecuencia durante cada impulso y T es la longitud del impulso. (Por ejemplo, si el radar realiza un barrido (chirrido) a través de la gama de frecuencias 1 250-1 280 MHz (= 30 MHz de espectro) durante cada impulso y si la longitud del impulso es de 10 μ s, la anchura de banda de medición debe ser: ≤ ((30 MHz)/(10 μ s))^{1/2} = $\sqrt{3}$ MHz ≈ 1,73 MHz. De acuerdo con la nota de pie de página 1, en este ejemplo se debe utilizar una anchura de banda de medición próxima a 1 MHz, pero menor o igual que este valor.

¹ En todos los casos, si la anchura de banda de medición obtenida anteriormente es mayor que 1 MHz, se deberán aplicar las correcciones descritas en el § 3.2.

- ≤ El resultado de una medición es el siguiente: Para los radares que funcionan con múltiples formas de onda, la anchura de banda de referencia se determina empíricamente a partir de las observaciones de la emisión del radar. La observación empírica se hace como sigue: el receptor del sistema de medición se sintoniza con una de las frecuencias fundamentales de radar, o se sintoniza con la frecuencia central dentro de la gama de chirrido del radar. La anchura de banda del sistema de medición se fija al mayor valor disponible, y se registra el nivel de potencia recibido del radar en esta anchura de banda. La anchura de banda de medición se reduce después progresivamente, y el nivel de potencia recibido se registra en función de la anchura de banda. El resultado final es un gráfico o tabla que muestra la potencia medida en función de la anchura de banda del sistema de medición. La anchura de banda de medición apropiada será la anchura de banda en la cual se observa la primera reducción del nivel de potencia completo. Si se observa inmediatamente una reducción del nivel de potencia, se debe utilizar la mayor anchura de banda disponible.

Anchura de banda de vídeo ≥ Anchura de banda del sistema de medición.

Detector: Cresta positiva.

3.1 Mediciones dentro del dominio fuera de banda

Dentro del dominio fuera de banda, los límites indicados en la Recomendación UIT-R SM.1541 se definen en dBpp. Ésta es una medición de potencia relativa y una anchura de banda FI que resulta en una anchura de banda de medición inferior a la anchura de banda de referencia que se debe utilizar. Incluso si la anchura de banda de medición es menor que la anchura de banda de referencia, no hay que hacer correcciones, porque la cresta del espectro y los puntos de datos dentro del dominio fuera de banda se miden utilizando la misma anchura de banda B_m .

En general, las mediciones se deben efectuar utilizando una anchura de banda que esté próxima a la anchura de banda de referencia especificada, pero que sea menor que ésta. Este método minimizará el tiempo de medición pero causará también cierta ampliación del espectro medido. Por tanto, en situaciones marginales, cuando puede ser importante la medición del próximo verdadero a la conformación de espectro, se recomienda que se mida de nuevo la región próxima dentro del dominio fuera de banda utilizando una anchura de banda máxima de $0,2/T$ o $0,2/t$, según proceda.

3.2 Mediciones en el dominio de emisiones no esenciales

3.2.1 Corrección de la medición dentro del dominio de emisiones no esenciales

Cuando la anchura de banda de medición, B_m , difiere de la anchura de banda de referencia, B_{ref} , hay que aplicar un factor de corrección a las mediciones realizadas dentro del dominio de emisiones no esenciales para expresar los resultados en la anchura de banda de referencia. Entonces se debe aplicar el siguiente factor de corrección:

$$\text{Nivel no esencial, } B_{ref} = \text{Nivel no esencial (medido en } B_m) + 10 \times \log(B_{ref}/B_m)$$

NOTA 1 – Se debe usar este factor de corrección, salvo cuando se sabe que la emisión no esencial es similar al ruido, en cuyo caso se puede aplicar un factor entre 10 y $20 \log(B_{ref}/B_m)$ y puede ser obtenido por mediciones en más de una anchura de banda. En todos los casos, el resultado más preciso se obtendrá utilizando un ancho de banda de medición (B_m) igual al ancho de banda de referencia. Para los radares que funcionan por encima de 1 GHz, el ancho de banda de referencia (B_{ref}) es 1 MHz.

3.2.2 Corrección de los datos de medición de la potencia en la cresta de la envolvente (PEP)

En el dominio de emisiones no esenciales, los límites indicados en el Apéndice 3 al RR se definen en una anchura de banda de referencia, B_{ref} , con respecto a la potencia en la cresta de la envolvente (PEP). Los datos registrados en dBpp dentro del dominio de emisiones no esenciales deben hacer referencia a la PEP (y no a la cresta de espectro observada en dBpp).

La PEP se aproxima utilizando las siguientes fórmulas de corrección:

Para onda continua e impulsos codificados en fase:

$$PEP = P_{meas} + 20 \times \log(B_{pep}/B_m) \quad \text{para } B_{pep} > B_m$$

Para radares de impulsos con barrido de frecuencia (MF o chirrido):

$$PEP = P_{mes} + 10 \times \log(B_c / (B_m^2 \times T)) \quad \text{para } (B_m^2 T) / B_c < 1$$

donde:

PEP : potencia en la cresta de la envolvente;

P_{meas} : potencia de cresta de espectro (B_m);

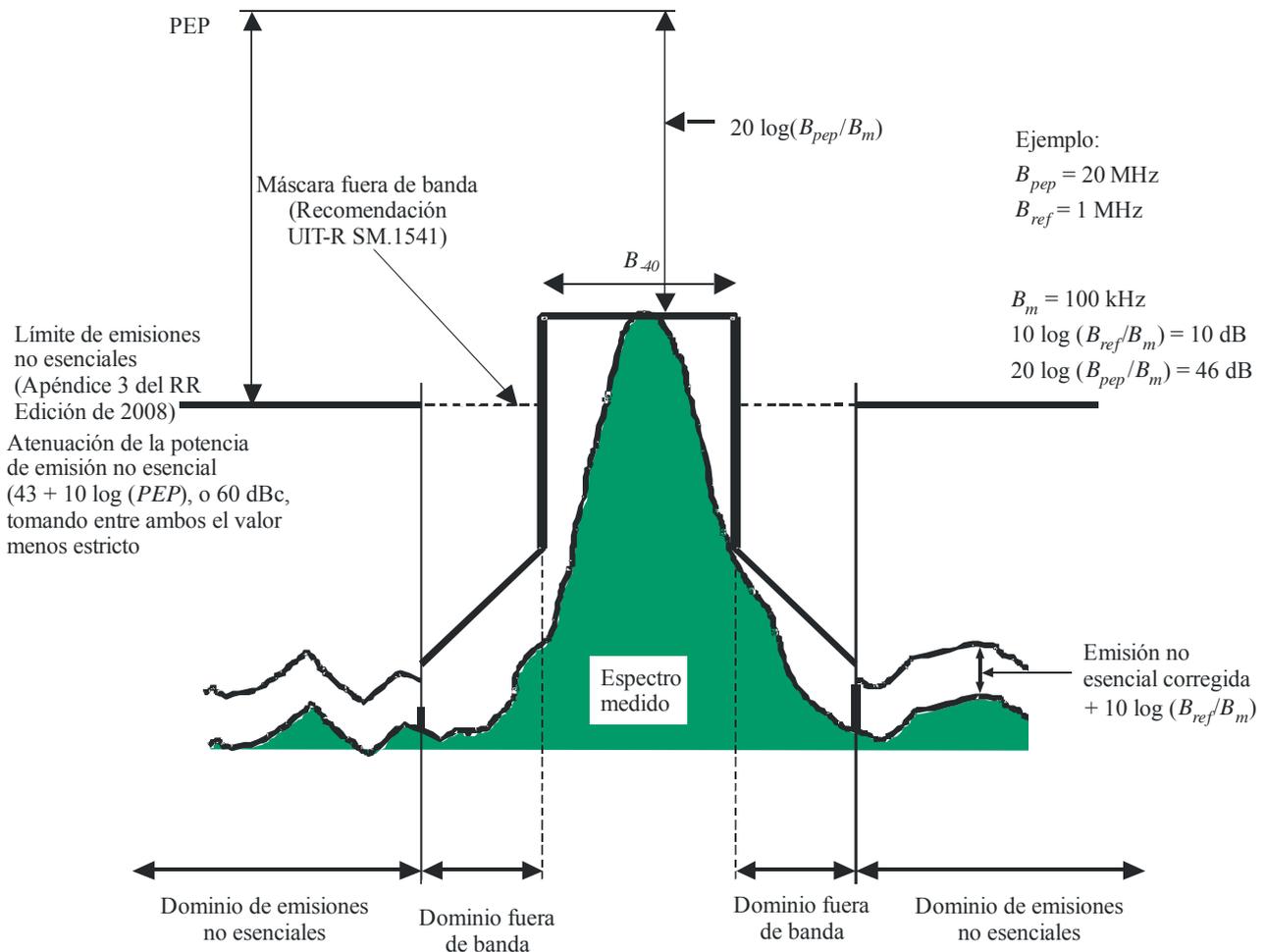
B_{pep} : anchura de banda calculada de acuerdo con lo siguiente:

- para radares sin codificación de impulsos de frecuencia fija, se divide por la longitud de impulso del radar, (s) (por ejemplo, si la longitud de impulsos de radar es 1 μ s, la anchura de banda de referencia es 1/1 μ s = 1 MHz);
- para radares de impulsos codificados en fase de frecuencia fija, se divide por la longitud de segmento codificado en fase (s) (por ejemplo, si la longitud del segmento codificado en fase es 2 μ s, la anchura de banda de referencia es 1/2 μ s = 500 kHz);
- para radares de barrido de frecuencia MF o de chirrido, la raíz cuadrada de la cantidad obtenida dividiendo la anchura de banda del chirrido en MHz por la longitud del impulso (μ s) (por ejemplo, si la MF está comprendida entre 1 250 MHz y 1 280 MHz o 30 MHz durante el impulso de 10 μ s, la B_{pep} es $(30 \text{ MHz}/10 \mu\text{s})^{1/2} = 1,73 \text{ MHz}$);
- para radares que funcionan con múltiples formas de onda, la anchura B_{pep} se determina empíricamente a partir de las observaciones de la emisión del radar. La observación empírica se hace como sigue: El receptor del sistema de medición se sintoniza con una de las frecuencias fundamentales de radar, o se sintoniza con la frecuencia central dentro de la gama de chirrido del radar. La anchura de banda del sistema de medición se fija al mayor valor disponible, y se registra el nivel de potencia recibido del radar en esta anchura de banda. La anchura de banda de medición se reduce después progresivamente, y el nivel de potencia recibido se registra en función de la anchura de banda. El resultado final es un gráfico o tabla que muestra la potencia medida en función de la anchura de banda del sistema de medición. La anchura de banda requerida es la más pequeña en la cual se observa aún el nivel de potencia total y B_{pep} se puede calcular a partir del conocimiento de la respuesta de impulsos del receptor de medición utilizando los criterios descritos a continuación. Si se observa inmediatamente una reducción del nivel de potencia, se debe utilizar la mayor anchura de banda disponible. Las correcciones descritas en el § 3.2 se ilustran gráficamente en la Fig. 1.

Como se puede observar en la Fig. 1, la máscara fuera de banda y el espectro medido han sido referenciados al nivel PEP equivalente utilizando el factor $20 \log(B_{pep}/B_m)$. La Figura muestra también que la emisión no esencial medida es desplazada hacia arriba por una magnitud igual al factor de corrección descrito en el § 3.2.1 (aquí tomado como $10 \log(B_{ref}/B_m)$). En este ejemplo, se eligió una anchura de banda de medición de 100 kHz solamente con fines ilustrativos, aunque en este caso se recomienda una anchura de banda próxima a 1 MHz. También con fines ilustrativos, la máscara se muestra desplazada en frecuencia, según lo permitido en la Recomendación UIT-R SM.1541.

FIGURA 1

Ilustración gráfica de la corrección descrita en el § 3.2



M.1177-01

4 Mediciones para radares de múltiples impulsos o múltiples modos

Para los radares con múltiples formas de onda de impulsos, se debe calcular la anchura de banda de B_{-40} dB para cada tipo de impulso y la anchura de banda de B_{-40} dB máxima obtenida se utilizará para establecer la forma de la máscara de emisión (véase el Anexo 8 a la Recomendación UIT-R SM.1541).

Para los radares con múltiples fijaciones de duración de impulsos, que pueden ser seleccionadas individualmente, se debe utilizar la fijación que resulta en la anchura de banda de B_{-40} dB mayor calculada (véase el Anexo 8 a la Recomendación UIT-R SM.1541). Sólo hay que efectuar mediciones de las emisiones para esta fijación de duración de impulsos.

Para los radares que utilizan exploración del haz en elevación, normalmente sólo se efectúan mediciones en el plano acimutal.

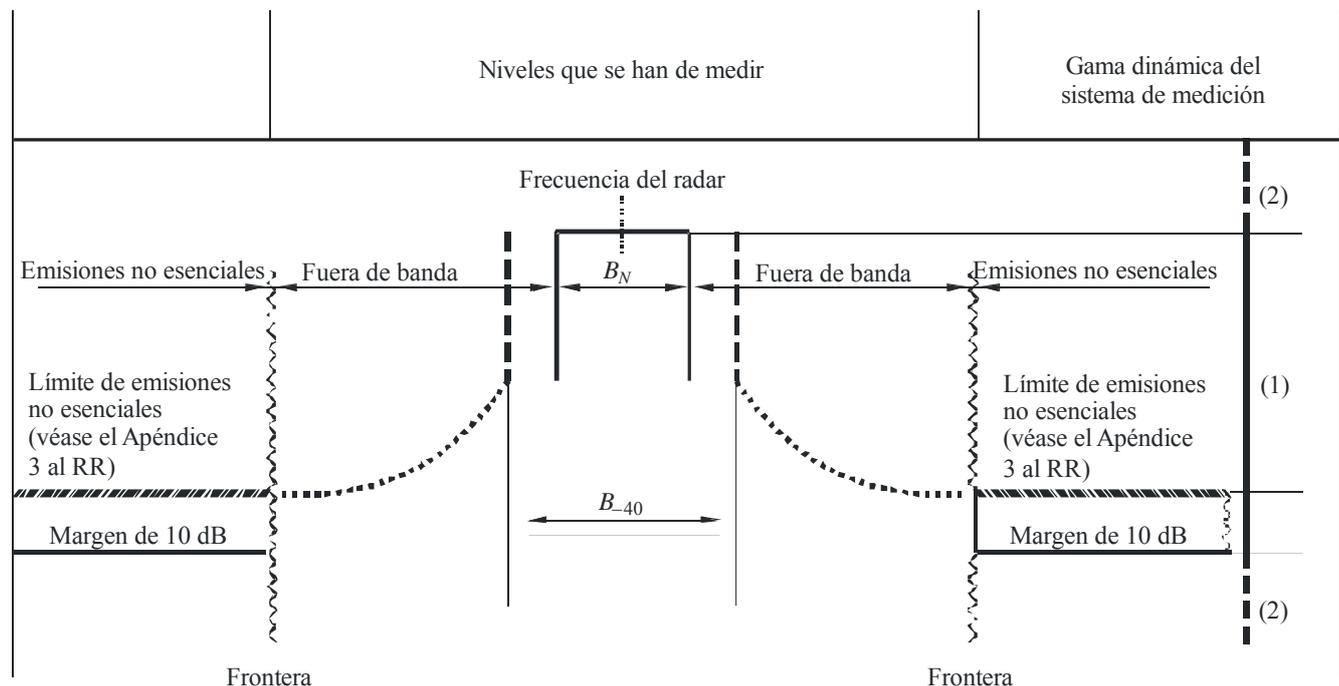
5 Gama dinámica del sistema de medición

El sistema de medición debe ser capaz de medir los niveles de emisiones no deseadas indicados en el Apéndice 3 al RR. Para obtener una visión completa del espectro, especialmente en el dominio de emisiones no esenciales, se recomienda poder medir niveles de emisiones 10 dB por debajo de los niveles indicados en el Apéndice 3 al RR.

Para un elevado nivel de confianza de los resultados, la gama dinámica de medición del sistema debe ser considerablemente más alta que la gama de medición requerida (margen (2) en la Fig. 2).

La relación entre la gama de medición requerida y la gama dinámica recomendada del sistema de medición se muestra en la Fig. 2.

FIGURA 2
Relación entre la gama de medición requerida y la gama de medición recomendada del sistema de medición



- (1): Gama de medición recomendada
- (2): Margen

NOTA 1 – Se debe señalar que los límites indicados en la categoría B de la Recomendación UIT-R SM.329 son en algunos casos más estrictos que los del Apéndice 3 al RR. Esto se debe de tener en cuenta al evaluar la gama de medición requerida y la gama dinámica recomendada del sistema de medición.

6 Métodos directos

Los dos métodos directos que se describen a continuación se pueden utilizar para medir emisiones no deseadas (fuera de banda y no esenciales) procedentes de sistemas de radar. El primer método es controlado manualmente y el segundo método es controlado automáticamente. Ambos métodos se han utilizado para medir las características de las emisiones de sistemas de radar que funcionan en frecuencias de hasta 24 GHz, con potencias de salida del transmisor de varios megavatios y niveles de p.i.r.e. en la gama de gigavatios. Habida cuenta de los aspectos de seguridad, estos métodos pueden ser aplicados también en una cámara anecoica.

6.1 Condiciones del entorno de medición

En relación con la distancia de medición, se pueden realizar mediciones en campo cercano o en campo lejano. La variación de la señal recibida de cresta debe ser inferior a 3 dB utilizando el absorbedor cuando la antena receptora se mueve $\lambda D/2H$ horizontal o verticalmente lejos del punto donde se recibe la señal máxima (H : altura del punto transmisor, D : distancia de medición, λ : longitud de onda de transmisión).

En relación con el sitio de medición, es preferible colocar las antenas transmisora y receptora en un lugar bastante alto, por ejemplo, en torres. Obsérvese que la altura debe ser determinada considerando la anchura del haz vertical del radar y las antenas de medición, y no debe haber objetos reflectivos entre las antenas.

6.2 Soporte físico y soporte lógico de la medición

En las Figs. 3 (método manual) y 4 (método automático) se representa un diagrama de bloques del tipo del sistema de medición requerido para los dos métodos directos. El primer elemento del sistema que se ha de considerar es la antena de recepción. Esta antena receptora debe tener una respuesta en frecuencia de banda ancha, al menos tan amplia como la gama de frecuencias que va a medirse. Generalmente también conviene que tenga una respuesta de alta ganancia (como es el caso de los reflectores parabólicos). El valor de alta ganancia permite una mayor gama dinámica en la medición y la anchura de haz estrecho de la antena proporciona discriminación contra otras señales que pueda haber en la zona; la anchura de haz estrecho minimiza los problemas de la propagación por trayectos múltiples del radar que se mide, y los datos del espectro recogidos con una antena parabólica requieren una corrección mínima después de la medición, como se examina en el siguiente punto. La polarización de la alimentación de la antena se elige de forma que se maximice la respuesta a la señal del radar. La polarización circular de la alimentación es una buena elección cuando no se conoce, a priori, la polarización del radar. La polarización de la antena se puede probar rotando la alimentación (si se utiliza polarización lineal) o intercambiando alimentaciones polarizadas levógiras y dextrógiras, si se utiliza polarización circular.

Se deben considerar las correcciones para ganancia de antena variable en función de la frecuencia. Los niveles de ganancia de antena se suelen especificar con respecto a la ganancia de una antena teóricamente isótropa perfecta (dBi). La apertura efectiva de una antena isótropa disminuye $20 \log(f)$, donde f es la frecuencia que se mide. Esto significa que, si la antena de medición tiene una apertura efectiva constante (es decir, tiene una ganancia isótropa que aumenta $20 \log(f)$), no hay que hacer correcciones para la ganancia de antena variable. Este requisito es satisfecho por una antena de reflector parabólica teóricamente perfecta, y es uno de los motivos de preferir esta antena para una medición de espectro de radar de banda ancha.

A la inversa, en la medida en que la ganancia de la antena de medición se desvía con respecto a una curva de $20 \log(f)$ (incluida una antena menos parabólica que lo ideal), las mediciones resultantes deben ser corregidas para esta desviación.

Hay que considerar también el cable que conecta la antena de medición con el sistema de medición. Mediante un cable de RF de bajas pérdidas de una cierta longitud (que variará según las circunstancias geométricas del sistema de medición en cada emplazamiento de radar de medición) se conecta la antena al extremo frontal de RF del sistema de medición. Como las pérdidas en ese trozo de línea atenúan la señal de radar recibida, conviene que la longitud del cable sea lo más pequeña y tenga la menor pérdida posible.

FIGURA 3

Diagrama de bloques para la medición de emisiones radiadas no deseadas de radares con el método directo controlado manualmente

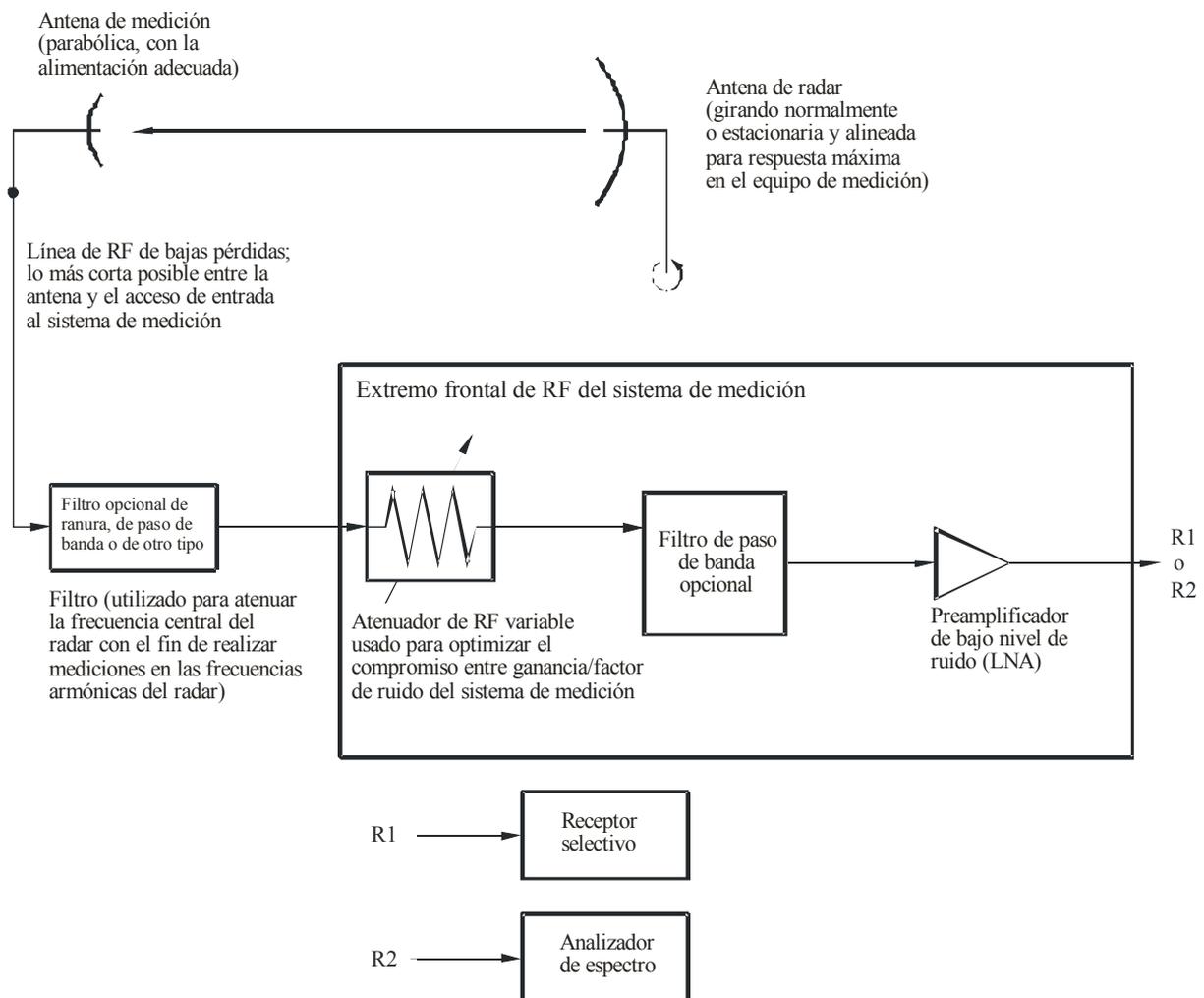
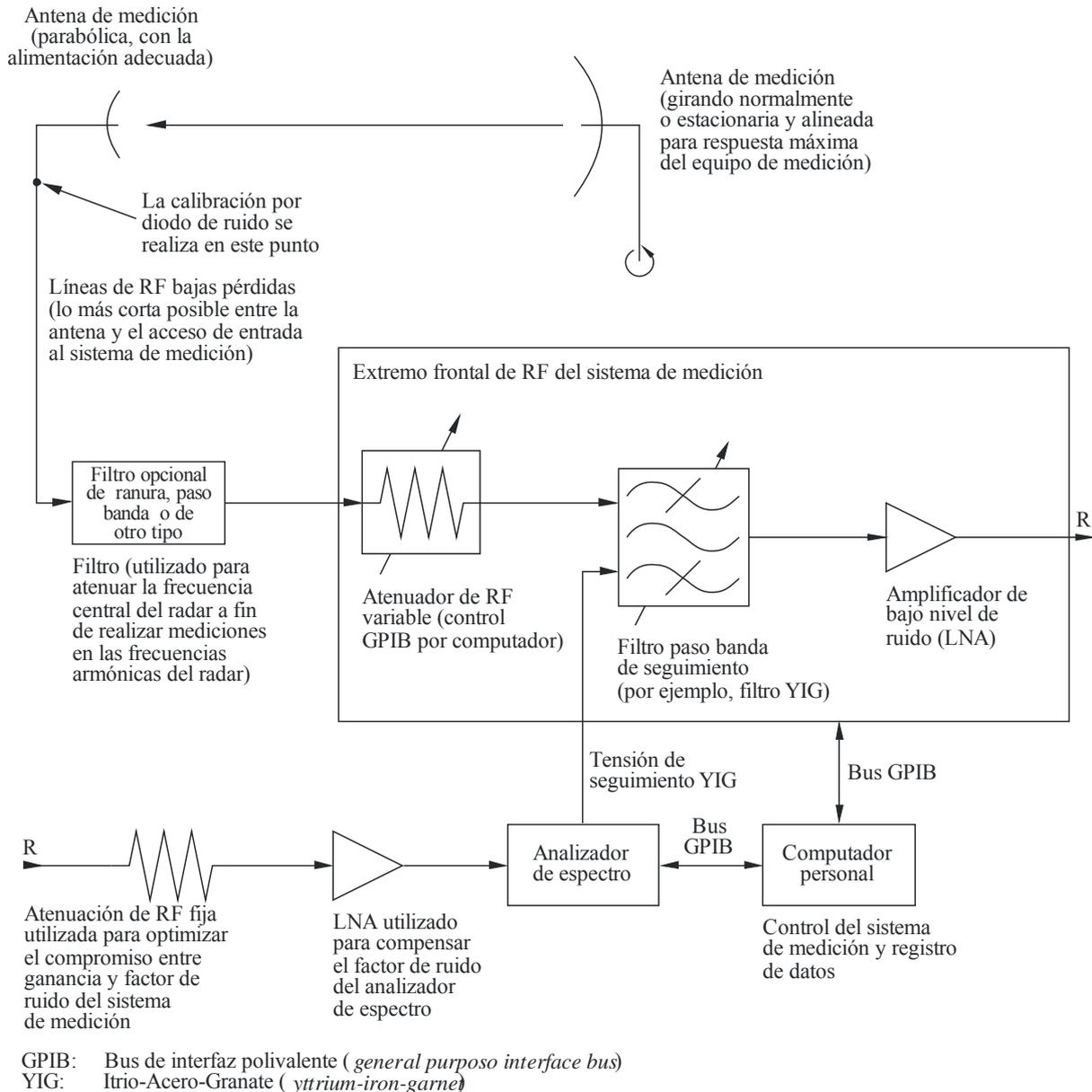


FIGURA 4

Diagrama de bloques del sistema de medición de emisiones radiadas no deseadas de radares con el método directo controlado automáticamente



M.1177-04

El extremo frontal de RF es una de las partes más críticas de todo el sistema de medición. Ejecuta tres funciones vitales. La primera es el control y extensión de la gama dinámica del sistema de medición mediante el uso de atenuación de RF variable. La segunda es el filtrado de banda de paso (preselección) para impedir la sobrecarga de los amplificadores por señales de gran amplitud que no están sintonizadas en la frecuencia del sistema de medición. La tercera es la preamplificación de bajo nivel de ruido para proporcionar la sensibilidad máxima a las emisiones que puede ser de hasta 130 dB por debajo del nivel medido de cresta en la frecuencia fundamental del radar.

A continuación se considera cada una de estas funciones en el extremo frontal de RF.

El atenuador de RF es el primer elemento en el extremo frontal. Proporciona una atenuación variable (por ejemplo, 0-70 dB) en incrementos fijos (por ejemplo, por pasos de atenuación de 10 dB). La utilización de este atenuador durante las mediciones amplía la gama dinámica del sistema de medición en una cantidad igual a la máxima atenuación disponible (por ejemplo, 70 dB en el caso de un atenuador de 0 a 70 dB).

6.2.1 Sistema de medición controlado manualmente

La medición controlada manualmente consiste en barridos a través del espectro en incrementos fijos (igual al valor de un tramo). En cada barrido de frecuencia, el atenuador es ajustado para mantener la potencia de cresta del radar dentro de la gama dinámica de los otros elementos del sistema de medición (a menudo el amplificador de extremo frontal y el amplificador logarítmico del analizador del espectro son los elementos limitadores). Con el atenuador RF de extremo frontal debidamente ajustado en cada barrido, se efectúa una medición de la potencia de radar en esa frecuencia.

Se puede usar un filtro de paso de banda controlado manualmente en este punto para evitar sobrecargar el preamplificador (y por tanto producir ganancia de compresión) si es necesario medir emisiones no esenciales muy bajas (es decir, emisiones fundamentales de nivel – emisiones no esenciales de nivel > dinámica de medición instantánea).

El elemento final en el extremo frontal RF es un LNA instalado como el siguiente elemento en el trayecto de la señal después del preselector. La característica de entrada de bajo nivel de ruido del LNA proporciona alta sensibilidad a emisiones de radar no esenciales de baja amplitud y su ganancia tiene en cuenta el factor de ruido del resto del sistema de medición (por ejemplo, una longitud de línea de transmisión y un analizador de espectro).

La sensibilidad y gama dinámica del sistema de medición son optimizados por la selección adecuada de las características de ganancia y factor de ruido del LNA. Es conveniente minimizar el factor de ruido a la vez que se proporciona ganancia suficiente para tener en cuenta todos los circuitos de medición después del LNA (esencialmente la atenuación de línea de RF después del extremo frontal, más el factor de ruido de los circuitos del analizador de espectro). Idealmente, la suma de la ganancia y el factor de ruido del LNA (que es el ruido excesivo producido por el LNA con una terminación a 50Ω en su entrada) debe ser aproximadamente igual al factor de ruido del resto del sistema de medición.

Los valores típicos del factor de ruido del analizador de espectro son 25-45 dB (que varían en función de la frecuencia), y las atenuaciones de línea de transmisión pueden ser generalmente 5-10 dB, dependiendo de la calidad y de la longitud de la línea. Como resultado de la variación del factor de ruido del sistema de medición en función de la frecuencia, se pueden necesitar varios LNA utilizados en octavas de frecuencia (por ejemplo, 1-2 GHz, 2-4 GHz, 4-8 GHz, 8-18 GHz, 18-26 GHz, y 26-40 GHz). Cada LNA puede ser optimizado en cuanto a la ganancia y factor de ruido dentro de cada octava de frecuencia. Esto ayuda también a adaptar los LNA con cortes de octava entre diversos filtros YIG (por ejemplo, 0,5-2 GHz, 2-18 GHz, etc.). El uso de un LNA después del preselector (y, si se requiere, LNA en cascada a la entrada del analizador de espectro) puede reducir el factor de ruido global del sistema de medición en unos 10-15 dB. Se ha considerado que esta gama de factor de ruido es adecuada para la medición de espectros de emisiones de radar de banda ancha en una gama de hasta 130 dB.

Se prevé que el resto del sistema de medición de RF sea esencialmente un analizador de espectro disponible en el mercado o un analizador de espectro con un preselector o un receptor selectivo. Se puede utilizar cualquier equipo capaz de recibir señales en la gama de frecuencia de interés.

6.2.2 Sistema de medición controlado automáticamente

La clave para utilizar efectivamente el atenuador de extremo frontal de RF en una medición de radar, como se muestra en la Fig. 3, es sintonizar el sistema de medición en incrementos de frecuencia fija (por ejemplo, 1 MHz), denominados pasos, en vez de barrer a través del espectro, como se hace más tradicionalmente con los analizadores de espectro controlados manualmente. En cada paso de frecuencia fija, el atenuador es ajustado para mantener la potencia de cresta del radar dentro de la gama dinámica de los otros elementos del sistema de medición (a menudo el amplificador de extremo frontal y el amplificador logarítmico de analizador de espectro son los elementos limitadores). Cuando el atenuador RF de extremo frontal está ajustado debidamente en cada paso, se ejecuta una medición de la potencia del radar en esa frecuencia. De esta manera, una gama dinámica nominal de 60 dB para el sistema de medición es ampliada hasta 70 dB, hasta una gama dinámica resultante total de 130 dB. Para minimizar el tiempo de medición, este atenuador y el algoritmo de medición por pasos de frecuencia que se necesita pueden ser controlados por computador.

El siguiente elemento en el extremo frontal, el preselector de filtro de banda de paso sintonizable es necesario si hay que medir niveles de emisiones no esenciales de baja potencia en frecuencias que están adyacentes a emisiones fundamentales de niveles más altos (130 dB por debajo de la frecuencia fundamental). Por ejemplo, puede ser necesario medir emisiones no esenciales provenientes de un radar de control del tráfico aéreo en 2900 MHz que está en un nivel de -120 dBm en el circuito de medición, mientras que el nivel de emisión fundamental está en $+10$ dBm, y está distante en frecuencia sólo 150 MHz (en 2750 MHz). El sistema de medición requiere un LNA no atenuado para medir la emisión no esencial en 2900 MHz, pero el LNA será sobrecargado (y por tanto con compresión de ganancia) si se expone a la emisión fundamental no atenuada en 2750 MHz. Por este motivo, se requiere atenuación con dependencia de la frecuencia en el extremo frontal en una posición antes de la entrada al LNA. En la práctica, este filtrado de paso de banda sintonizable es proporcionado efectivamente por la tecnología de varactor (por debajo de 500 MHz) y por la tecnología de YIG (por encima de 500 MHz). Los filtros aplicables pueden ser obtenidos en el mercado y deben estar diseñados para seguir automáticamente la frecuencia sincronizada del sistema de medición.

El elemento final del extremo frontal de RF es un LNA. Dicho LNA está instalado como siguiente elemento en el trayecto de la señal tras el preselector. La característica de entrada de bajo nivel de ruido del LNA proporciona alta sensibilidad a emisiones no esenciales de baja amplitud del radar y su ganancia tiene en cuenta el factor de ruido del resto del sistema de medición (por ejemplo, un tramo de la línea de transmisión y un analizador de espectro).

Las consideraciones relativas a la sensibilidad y gama dinámica del sistema de medición, así como para los factores de ruido de analizadores de espectro típicos, son las mismas que las indicadas en el § 6.2.1.

Otra opción para la configuración del LNA es poner los LNA en cascada. El primer LNA se coloca entre dos etapas dentro del filtro preselector de banda de paso de YIG o de varactor. Tiene un factor de bajo nivel de ruido, pero sólo suficiente ganancia para tener en cuenta la pérdida por inserción de la segunda etapa del YIG. Un segundo LNA (posiblemente de calidad de funcionamiento más baja) se coloca inmediatamente después del YIG. Esta opción proporcionará un factor de ruido del sistema global un poco más bajo porque la segunda etapa del YIG es tenida en cuenta por el primer LNA. Sin embargo, esta opción puede requerir un diseño más avanzado y modificaciones técnicas del filtro preselector que una administración puede no considerar prácticas.

Una tercera opción para la configuración del LNA del sistema de medición, y que no requiere ningún nuevo diseño o retroadaptación del filtro preselector de extremo frontal, es colocar un LNA de ganancia más baja en el extremo frontal y un segundo LNA a la entrada de la señal del analizador de espectro. Se selecciona un primer LNA que tenga un factor de ruido muy bajo y

ganancia suficiente para tener en cuenta la atenuación de línea RF y el factor de ruido del LNA del analizador de espectro. El LNA del analizador de espectro se selecciona, a su vez, con una característica de ganancia que sea justamente adecuada para tener en cuenta el factor de ruido del analizador de espectro en la gama de frecuencias apropiada de la medición del radar. Este conjunto de dos LNA en cascada puede ser adquirido más fácilmente que un solo LNA extremadamente perfeccionado, y que típicamente será menos susceptible a la sobrecarga, pues cabe esperar que los puntos de compresión de 1 dB sean más altos que para los LNA más perfeccionados.

Se prevé que el resto del sistema de medición RF sea esencialmente un analizador de espectro disponible en el mercado. Se puede utilizar cualquier analizador de espectro que pueda recibir señales en la gama de frecuencias de interés y pueda ser controlado por computador para realizar el algoritmo de frecuencias escalonadas. Como se ha indicado anteriormente, el elevado factor de ruido de los analizadores de espectro actualmente disponibles debe compensarse mediante una preamplificación de bajo nivel de ruido si quiere lograrse que la medición realizada tenga la sensibilidad necesaria para detectar la mayoría de las emisiones no esenciales.

El sistema de medición puede controlarse mediante cualquier computador que tenga una interfaz de bus (GPIB) o equivalente compatible con el controlador del computador y la(s) tarjeta(s) de interfaz utilizados. En cuanto a memoria y velocidad, los computadores personales (PC) modernos son bastante adecuados. El algoritmo de medición (que realiza el escalonamiento de frecuencias del analizador de espectro y del preselector y controla el atenuador variable del extremo frontal) puede realizarse mediante programa informático. Algunos programas disponibles comercialmente pueden satisfacer esta necesidad, pero es probable que el organismo que lleva a cabo la medición deba escribir al menos una parte de su propio programa informático de medición. Aunque el desarrollo de un programa informático requiere un gasto de recursos considerable, la experiencia obtenida en la práctica con estos sistemas ha demostrado que vale la pena hacer esta inversión si se han de efectuar mediciones frecuentes y repetitivas de emisiones de radar.

Los datos se pueden registrar en el disco duro del computador o en otro disco. Lo más adecuado es que el registro de datos se realice cada 100-200 pasos de medición, con objeto de que el tamaño de los ficheros de datos sea manejable y a fin de evitar la pérdida de un volumen excesivo de datos si el computador u otros componentes del sistema de medición sufre una avería durante el proceso de medición.

6.3 Calibración del sistema de medición

6.3.1 Método directo manual

El método controlado manualmente requiere la calibración de todos los componentes de medición individualmente, o de todo el conjunto de medición con un generador calibrado (método de sustitución).

6.3.2 Método directo automático

El sistema de medición se calibra desconectando la antena del resto del sistema y conectando un diodo de ruido a la línea de RF en dicho punto. Para llevar a cabo la calibración de manera satisfactoria es más que suficiente un diodo con una relación de ruido en exceso (*ENR*, *excess noise ratio*) de 25 dB, donde $ENR = (temperatura\ efectiva\ (K),\ del\ diodo\ de\ ruido / temperatura\ ambiente,\ (K))$, suponiendo que el factor de ruido global del sistema sea inferior a 20 dB. La técnica es la medición normalizada de factor *Y* descrita en el Apéndice 2 al Anexo 1, realizando mediciones de potencia comparativas a través del espectro, una vez con el diodo de ruido en estado de conducción y otra vez con el diodo de ruido en estado de corte.

La calibración con diodo de ruido produce un cuadro de valores del factor de ruido y correcciones de ganancia para toda la gama espectral que va a medirse. Las correcciones de ganancia pueden

almacenarse en un cuadro de consulta y se aplican a los datos medidos a medida que se recopilan. El Apéndice 2 al Anexo 1 describe el procedimiento de calibración más detalladamente.

Por lo general, la antena de medición no se calibra en el terreno. Los factores de corrección de la antena (si hubiere alguno) se aplican en los análisis realizados después de las mediciones.

6.4 Procedimiento de medición

6.4.1 Método manual

En el Apéndice 1 al Anexo 1 se describe detalladamente el método directo; en este punto se proporciona un resumen del mismo.

Antes de la medición, se usa un analizador de espectro para detectar la presencia de señales no emitidas por el radar: si hay emisiones que corrompen la medición, se deben utilizar filtros apropiados.

Función de retención máxima

Frecuencia central del analizador de espectro la frecuencia más baja que se ha de medir (por ejemplo, si la frecuencia central del radar es 3 050 MHz, pero el espectro se ha de medir a través de 2-6 GHz, la frecuencia central inicial del analizador de espectro sería 2 GHz).

Intervalo de frecuencia del analizador de espectro = 10, 20, 50, 100 ó 500 MHz

Tiempo de barrido del analizador de espectro > tiempo de barrido automático

Tiempo > grabación de la señal durante un mínimo de tres intervalos de rotación del haz del radar (por ejemplo, si el radar tiene una velocidad de rotación de 40 r.p.m. o cada rotación dura 1,5 s, la duración debe ser $> 3 \times 1,5$ s; un valor de 4,5 s sería razonable). Grabación de la señal durante un tiempo suficiente para formar el espectro. La antena del radar puede dejarse estacionaria y alineada para la respuesta máxima del sistema de medición.

NOTA 1 – La fijación del tiempo de barrido del analizador de espectro y la duración del registro de la señal deben ser validados.

El segundo punto de medición se hace sintonizando el sistema de medición con la siguiente banda de frecuencias que se ha de medir. Esta frecuencia es óptimamente igual a la primera banda de frecuencias medida más el intervalo medido.

Cuando el instrumento de medición es un receptor selectivo, la medición se efectúa punto por punto de acuerdo con la anchura de banda recomendada.

6.4.2 Método automático

En el Apéndice 1 al Anexo 1 se describe detalladamente el método directo; en este punto se proporciona un resumen del mismo. Además de los parámetros indicados en el § 2, el analizador de espectro debe ajustarse de la forma siguiente:

Frecuencia central del analizador de espectro frecuencia más baja que va a medirse. (Por ejemplo, si la frecuencia central del radar es 3 050 MHz pero el espectro va a medirse entre 2 y 6 GHz, la frecuencia central inicial del analizador de espectro sería de 2 GHz).

- Intervalo de frecuencia del analizador de espectro = 0 Hz (el analizador funciona como un instrumento del dominio temporal).
- Duración del paso del analizador de espectro > intervalo de rotación del haz del radar. (Por ejemplo, si la antena del radar tiene una velocidad de giro de 40 r.p.m., es decir, cada rotación dura 1,5 s, la duración del paso debe ser > 1,5 s. Un valor de 2 s sería razonable). Para radares ágiles en frecuencia o radares con haces de antena de exploración vertical, la duración del paso puede ser varios periodos de rotación de la antena. Para estos sistemas de radar más complejos, la duración de los pasos se debe determinar empíricamente.

Una vez que el haz de la antena del radar realiza su exploración normalmente y si el sistema de medición está dispuesto como se ha descrito anteriormente, se obtiene el primer punto de datos. Un punto de datos consiste en un par de números: nivel de potencia medido y frecuencia a la cual se mide dicho nivel de potencia. Por ejemplo, el primer punto de datos de la medición anterior puede ser de -93 dBm a 2000 MHz. El punto de datos se obtiene supervisando la emisión del radar a la frecuencia deseada, en un intervalo de frecuencia de 0 Hz, para un intervalo (duración de paso) ligeramente superior al periodo de rotación de la antena del radar, o para una duración de paso más larga para sistemas de radar complejos. Esta presentación en el tiempo de la rotación del haz de la antena del radar aparecerá en la pantalla del analizador de espectro. El punto más elevado de la traza representará normalmente la potencia recibida cuando el haz del radar se orienta en el sentido del sistema de medición. Dicho valor máximo de potencia recibida es recogido (normalmente por el computador de control aunque puede ser inscrito de forma manual), corregido (para tener en cuenta la ganancia del sistema de medición en dicha frecuencia) y registrado (generalmente en un fichero de datos contenido en un disco magnético).

El segundo punto de medición se obtiene sintonizando el sistema de medición a la siguiente frecuencia que va a medirse. En el caso óptimo esta frecuencia debe ser igual a la primera frecuencia medida más la anchura de banda de medición (por ejemplo, si la primera medición se realiza a 2000 MHz y la anchura de banda de medición es de 1 MHz, la segunda frecuencia de medición debería ser de 2001 MHz). En esa segunda frecuencia se repite el procedimiento: medición de la máxima potencia recibida durante el intervalo de rotación del haz del radar, corrección para tener en cuenta el factor o factores de ganancia y registro del punto de datos resultante.

Este procedimiento, que consiste en un escalonamiento (en vez de un barrido) del espectro, continúa hasta que se haya realizado la medición de todo el espectro de emisión deseado. El proceso de escalonamiento consiste en una serie de mediciones de amplitud hechas en frecuencias predeterminadas (sintonizadas fijas) en una banda de espectro de interés. El cambio de frecuencia entre los pasos es óptimamente igual a la anchura de banda de FI del sistema de medición. Por ejemplo, las mediciones de 200 MHz de espectro pudieran utilizar 200 pasos en un intervalo de paso de 1 MHz y una anchura de banda de FI de 1 MHz. El intervalo de pasos se puede fijar más amplio en el dominio de emisiones no esenciales para acelerar toda la medición. Sin embargo, en frecuencias que son múltiplos enteros (por ejemplo, 2, 3, 4) de la emisión de radar fundamental, el intervalo de paso máximo debe ser en este caso también igual a la anchura de banda de FI del sistema de medición.

El sistema de medición permanece sintonizado con cada frecuencia durante un intervalo de medición especificado. El intervalo se denomina duración de paso o morada. La duración para cada paso es especificada por el operador del sistema de medición, y normalmente es un poco más larga que el intervalo de exploración del haz del radar.

Es conveniente que el sistema de medición sea controlado por computador (paso, sintonía, medición, corrección de ganancia y repetición) si este proceso se ha de ejecutar con eficacia y exactitud. Para medir correctamente la cresta de la emisión fundamental puede ser necesario utilizar un intervalo de paso más pequeño del orden de la mitad o menos de la anchura de banda de medición en esta región.

La técnica de duración escalonada es necesaria para permitir la inserción de un atenuador de RF en el extremo frontal del sistema de medición a medida que las frecuencias se aproximan a la frecuencia central (y a cualquier otro valor de cresta) del espectro del radar. Esta posibilidad de añadir atenuación de manera selectiva en frecuencia permite ampliar la gama dinámica disponible para la medición hasta unos 130 dB, si se utiliza un atenuador de RF entre 0 y 70 dB con un sistema de medición de 60 dB de gama dinámica instantánea. Esta circunstancia es de gran interés a la hora de identificar emisiones no esenciales de potencia relativamente baja. Para lograr el mismo efecto con una medición mediante barrido de frecuencias, puede insertarse un filtro de ranura a la frecuencia fundamental del radar, pero no es posible insertar un filtro de esas características para cada uno de los otros valores de cresta de elevada amplitud que puedan aparecer en el espectro.

Es importante aplicar el filtrado paso de banda adecuado en el extremo frontal del sistema de medición, de manera que las componentes de valor elevado de señales de distintas frecuencias no afecten la medición de las componentes no esenciales de baja potencia.

Estas mediciones se pueden efectuar sin necesidad de que el haz sea medido en el espacio, salvo que se compruebe que la dirección del haz del radar no varía respecto del eje mecánico de la antena en la gama de frecuencias de medición.

6.4.3 Método indirecto

La Fig. 5 ilustra la separación de componentes recomendada para aplicar el método indirecto. En dicho método, en el que las emisiones no deseadas se miden en la junta giratoria y a continuación se combinan con las características de antena medidas separadamente para distancias de 5 m y 30 m introduciendo la corrección de campo lejano adecuada, el procedimiento es el siguiente:

Paso 1: Se realizan mediciones de las emisiones de un transmisor de radar en la junta giratoria con un alimentador (como muestra la Fig. 6).

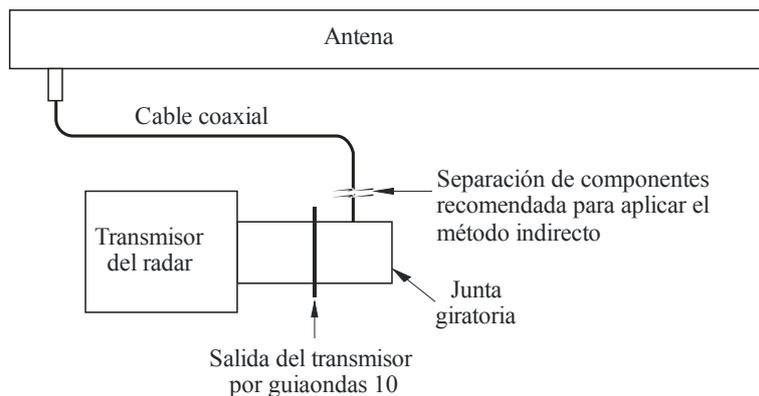
Paso 2: Se realizan mediciones separadas de la máxima ganancia de la antena de radar en las frecuencias de emisión determinadas en el Paso 1. En este caso, las mediciones se realizan a las distancias de 5 m para frecuencias inferiores a 5 GHz y de 30 m para frecuencias superiores a 5 GHz (como muestra la Fig. 7).

Paso 3: Se corrigen las ganancias medidas con un factor de corrección apropiado (utilizando el programa informático indicado en el Apéndice 4 al Anexo 1 para las frecuencias en las que se observaron las emisiones del Paso 1).

Paso 4: Se combinan los resultados de los Pasos 1 y 3 para obtener la radiación de p.i.r.e. indirecta en las frecuencias observadas de emisiones no deseadas.

FIGURA 5

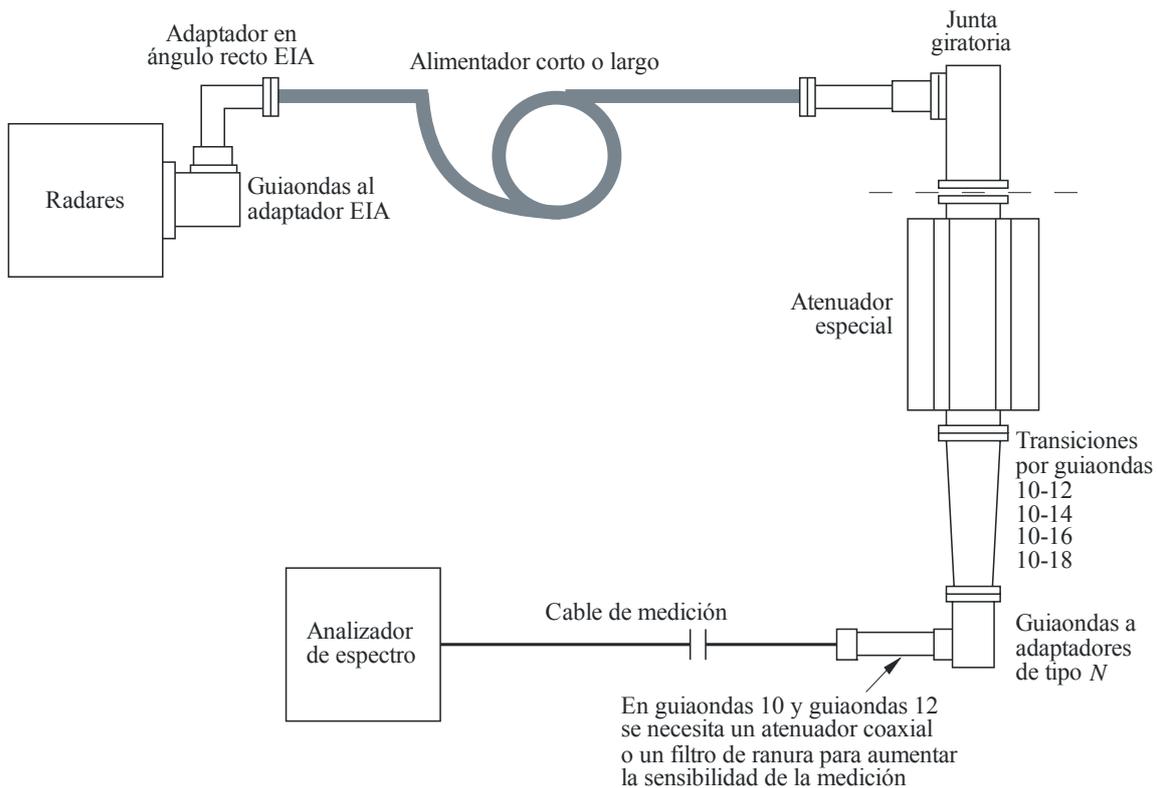
Sistema de radar típico



M.1177-05

FIGURA 6

Medición en el acceso de la junta giratoria



EIA: Electronics Industry Associations

M.1177-06

6.4.3.1 Método de medición y problemas asociados a los guiaondas

La medición del espectro de potencia de salida del transmisor plantea dos problemas principales. Uno de ellos es el acceso a las componentes de las frecuencias más elevadas del espectro transmitido sin distorsión y el otro es la medición de emisiones de muy bajo nivel en presencia del impulso de transmisión fundamental, que puede alcanzar una potencia de cresta de 60 kW.

En todo guiaondas, el modo de propagación, TE_{10} , puede medirse utilizando un sistema de medición calibrado. Las características principales de un sistema de ese tipo son las siguientes: atenúa la señal fundamental de gran potencia lo suficiente como para proteger al equipo de medición, a otras frecuencias ofrece una atenuación despreciable y la energía se mide en el modo TE_{10} .

Es bien sabido que las emisiones en frecuencias no esenciales a la salida del transmisor pueden ser de modos de orden superior y esta posibilidad se ha de considerar al configurar el sistema de medición. Sin embargo, para radares simples, esta posibilidad casi nunca será significativa puesto que es más probable que dichos modos de orden superior queden atrapados en el adaptador guiaondas-cable coaxial o en el alimentador de antena y la junta giratoria de conexión a la antena del radar. (Los adaptadores guiaonda-cable coaxial están diseñados únicamente para acoplar energía en el modo TE_{10} .)

6.4.3.2 Sistema de medición para la medida de emisiones no deseadas en un guiaondas

Este sistema de medición permite medir con precisión bajos niveles de emisión en presencia de impulsos de radar de alta potencia.

Los componentes principales del sistema son un filtro de ranura y un conjunto de guiaondas de sección variable (guiaondas de bocina), desde el guiaondas 10 hasta el guiaondas de tamaño más reducido, para cubrir toda la gama de frecuencias de interés. El filtro de ranura incorpora un guiaondas recto, guiaondas 10, con elementos absorbentes en su interior que atenúan la señal fundamental mientras que a otras frecuencias presentan una atenuación despreciable. A fin de lograr la atenuación necesaria para proteger el equipo de medición y medir las emisiones de frecuencias más elevadas, se utilizan guiaondas lineales de sección variable a la salida del filtro de ranura.

Los guiaondas de bocina son filtros paso alto que rechazan, reflejándolas, las señales inferiores a la frecuencia de corte. Si se coloca directamente una bocina en el acceso de salida de un transmisor de radar, la frecuencia fundamental se reflejará hacia el transmisor provocando una desadaptación indeseable. Colocando la bocina tras el filtro de ranura, las señales reflejadas se absorben por segunda vez. Por consiguiente, las pérdidas de retorno a la frecuencia fundamental son normalmente de 34 dB, valor lo suficientemente bajo como para evitar un arrastre de la frecuencia del magnetrón.

Las frecuencias superiores a la de corte se transmiten a través de las transiciones hasta el equipo de medición. De ser posible, debe incluirse una sección corta de guiaondas para evitar el acoplamiento de modos amortiguados entre una bocina y una transición de guiaondas a coaxial.

6.4.3.3 Resultados de las mediciones en el puerto de la junta giratoria

La técnica de medición comprende una búsqueda por exploración de la banda de frecuencias de interés a fin de localizar y señalar las emisiones no deseadas significativas, seguida de una nueva medición detallada y precisa de la máxima amplitud de cada emisión.

6.4.3.4 Incertidumbre de la medición en un guiaondas

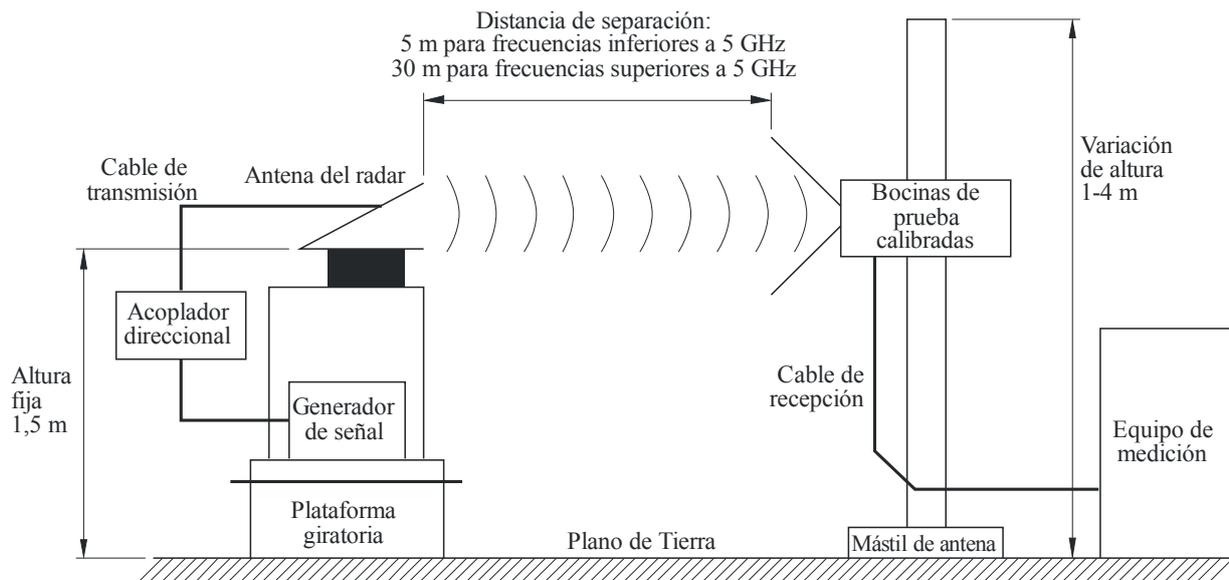
El sistema tiene una precisión en la medición de $\pm 1,3$ dB en las bandas de frecuencias de 2 a 18,4 GHz para el puerto del guiaondas. Se puede determinar que la incertidumbre total, con un nivel de confianza no inferior al 95%, es de $\pm 3,4$ dB, para el puerto del guiaondas que incluye el analizador de espectro.

6.4.3.5 Medición de las características de ganancia de antena en las frecuencias de emisión medidas

Este método indirecto recomienda que las mediciones de campo cercano se realicen sobre la antena situada en un emplazamiento de prueba de zona abierta a una distancia de 5 m, para frecuencias inferiores a 5 GHz, y de 30 m, para frecuencias superiores a 5 GHz. A continuación se aplican los factores de corrección para corregir las mediciones a fin de determinar la ganancia de campo lejano equivalente que presenta una aceptable correlación con la ganancia de campo lejano. En la Fig. 7 se muestra una disposición típica para realizar las mediciones.

FIGURA 7

Disposición para realizar mediciones de ganancia de campo cercano a distancias de 5 m y 30 m



M.1177-07

6.4.3.6 Procedimiento de medición de la ganancia de campo cercano para distancias de 5 m y 30 m

La medición de la ganancia máxima de la antena sometida a prueba se efectuará en las frecuencias no esenciales y fuera de banda medidas o identificadas, utilizando el método especificado en el § 6.4.3. Para cada frecuencia de emisión medida, o identificada, se deberá maximizar la ganancia de la antena sometida a prueba girándola en primer lugar 360° y a continuación se debe seguir aumentando dicha ganancia desplazando la bocina de prueba hacia arriba o hacia abajo. La ganancia de la antena sometida a prueba se obtiene midiendo la p.i.r.e. para cada distancia con un nivel de potencia conocido en la antena sometida a prueba para cada frecuencia de interés. Las ecuaciones (1) y (2) muestran los detalles de los cálculos necesarios para obtener la ganancia de

campo lejano equivalente, G_a , de la antenna sometida a prueba a partir del nivel del analizador de espectro medido, S .

$$G_a \text{ de la antenna sometida a prueba (dBi)} = \text{p.i.r.e. medida (dBm)} - P_{\text{entrada}} \text{ (dBm)} + G_c \text{ (dB)} \quad (1)$$

$$\text{p.i.r.e. medida (dBm)} = S \text{ (dBm)} + 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \text{ (dB)} - G_r \text{ (dBi)} \quad (2)$$

donde:

- G_a : ganancia de campo lejano equivalente de la antenna sometida a prueba (dBi)
- P_{entrada} : potencia de entrada a la antenna sometida a prueba (dB)
- G_c : factores de corrección de ganancia para distancias de 5 m y 30 m, que pueden calcularse para la antenna sometida a prueba utilizando el programa informático indicado en el Apéndice 4 al Anexo 1
- S : nivel del analizador de espectro medido (dBm)
- G_r : ganancia de la antenna de bocina de prueba del receptor (dBi)
- d : distancia de medición (m)
- λ : longitud de onda a la frecuencia de interés (m).

6.4.3.7 Corrección de ganancia/factores de reducción

El programa informático que se indica en el Apéndice 4 al Anexo 1 proporciona los factores de corrección de campo lejano a partir de las mediciones de campo cercano. El programa obtiene el factor de corrección para cada distancia a la frecuencia de interés, considerando los cambios de fase en la onda recibida a través de la antenna lineal (a distancias cortas el frente de ondas es esférico y no lineal). Por consiguiente, se puede utilizar para deducir la máxima ganancia de antenna en el infinito a partir de una medición de campo cercano.

Es importante tener en cuenta que no se considera el diagrama de ganancia de antenna. Cabe señalar que a las frecuencias no esenciales, la longitud eléctrica de la antenna es distinta de la longitud mecánica; puede ser mucho más corta. Ello se debe al diferente diagrama de iluminación en la longitud de la antenna para frecuencias distintas de la de diseño. Por tanto, se puede necesitar un modelo de programa informático más complejo o datos obtenidos utilizando el método directo para lograr resultados exactos en estos casos.

6.4.3.8 Incertidumbre en la medición de ganancia de campo cercano con los factores de corrección aplicados

Se puede calcular que la incertidumbre en la medición de caso más desfavorable es ± 6 dB, incluyendo las incertidumbres debidas al analizador de espectro, la ganancia de la bocina de prueba, las pérdidas del cable y las imperfecciones de la fuente y del emplazamiento. Se puede determinar, con un nivel de confianza no inferior al 95%, que la incertidumbre total es de $\pm 4,2$ dB.

La obtención de los factores de corrección para estas distancias supone que la abertura radiante de la antenna sometida a prueba es constante para todas las frecuencias.

6.4.3.9 Producción del espectro de emisión de un transmisor de radar en forma de p.i.r.e. mediante la combinación de las emisiones medidas y las características de ganancia de antenna

La técnica empleada para obtener un valor máximo de p.i.r.e. unidireccional es sumar, para cada frecuencia de emisión, a la máxima potencia generada por el transmisor de radar (dBm) la máxima ganancia directiva (dBi) de la antenna sometida a prueba. Ello significa que sólo es necesario

caracterizar dicha antena para las frecuencias a las que se observaron las emisiones del transmisor de radar.

Se considera que los efectos de la desadaptación de la antena sometida a prueba se tienen en cuenta automáticamente en las mediciones de ganancia debido a que el equipo de prueba está adaptado a 50Ω , que es la impedancia nominal de los conectores coaxiales, y las emisiones se miden en el receptor de medición de 50Ω .

6.4.3.10 Resumen

El método indirecto, que es eficaz en cuanto a ahorro de tiempo y de dispositivos, es lo bastante sensible como para permitir realizar mediciones de valores de emisión de bajo nivel con una precisión y repetibilidad razonables. Además, se puede aplicar cualesquiera que sean las condiciones meteorológicas y la gama de frecuencias de medición se puede ampliar fácilmente hasta 40 GHz o frecuencias superiores. Puede ser útil también utilizar este método junto con el método directo para evaluar los cambios por incrementos en un sistema de radar dado que ha sido medido previamente.

Apéndice 1 al Anexo 1

Descripción detallada de procedimientos y programa informático del método directo

El método directo supone que se cumplan las condiciones siguientes:

- la zona de radiación de campo lejano de un radar puede ser accedida por un sistema de medición como el que se describe en el cuerpo de este Anexo;
- las señales no deseadas alimentadas a través del radar directamente en el soporte físico del sistema de medición (es decir, evitando la antena del sistema de medición) puede ser minimizada a un nivel suficientemente bajo para asegurar que los resultados de la medición son exactos.

El método directo no requiere que el funcionamiento del radar esté coordinado con el sistema de medición, aunque en algunos casos puede ser provechoso un funcionamiento cooperativo para facilitar la medición.

El proceso del método directo es el siguiente:

Paso 1: Determinar un lugar de medición

El lugar de medición debe estar dentro o lo más cerca del haz de radiación principal del radar. Para radares de vigilancia de superficie y otros tipos de radar, esto puede ser relativamente fácil, pues el haz del radar barrerá la superficie, y el sistema de medición sólo tiene que estar colocado dentro de esta zona. Sin embargo, para muchos radares de vigilancia aérea, el haz principal no ilumina directamente el suelo. Para estos radares, el sistema de medición debe estar colocado dentro de la zona de acoplamiento máximo en la superficie. Esta zona puede ser determinada sintonizando el sistema de medición con la frecuencia fundamental del radar y desplazando después el sistema de medición en un vehículo desde una posición próxima al radar hasta una posición lejana (del orden de varios kilómetros) del radar. Se usa el sistema de medición para supervisar el nivel de señal recibida en función de la posición. Esto se puede hacer con un analizador de espectro en un

intervalo de frecuencia cero con un tiempo de barrido de 500 s, y vigilando el nivel de cresta cada pocos segundos cuando el radar barre detrás del vehículo. El resultado es una visualización temporal que muestra las ubicaciones de acoplamiento máximo.

Cualquier lugar dentro de la zona de acoplamiento máximo debe ser adecuado. En la práctica, se ha encontrado que esta zona comienza en no menos de 0,75 km de los radares de vigilancia aérea, y se extiende a no más de unos 2 km de los mismos radares. No suele haber un punto definido en que se produce el acoplamiento máximo, sino más bien una amplia zona dentro de estos límites.

Se debe considerar la cuestión de la propagación por trayectos múltiples. Los efectos de los trayectos múltiples no han sido observados casi nunca. Cuando han sido observados, ha sido en los casos en que el radar y el sistema de medición estaban separados por superficies acuáticas tranquilas. En otros casos, el terreno irregular y el uso de antenas de reflector parabólicas por el sistema de medición minimizan los efectos de la propagación por trayectos múltiples en una medida que los hace despreciables. Los efectos de la propagación por trayectos múltiples pueden ser comprobados repitiendo la medición del radar en una segunda ubicación y comparando los resultados de las dos ubicaciones de medición. Se considera también que estos efectos pueden ser minimizados levantando la antena de medición en un mástil telescópico a una altura de unos 10 m sobre el nivel del suelo. Esto proporciona también una mejor visibilidad directa entre el radar y el sistema de medición.

Paso 2: Configurar el sistema de medición y comprobar la energía alimentada no deseada a través de señales

El sistema de medición se configura con una antena de reflector parabólica en la parte superior de un mástil de 10 m (facultativo), o en una altura de al menos algunos metros sobre el nivel del suelo, para evitar los efectos de la propagación por trayectos múltiples y proporcionar una propagación con visibilidad directa razonablemente buena. El sistema de medición debe estar sintonizado con la frecuencia fundamental del radar o la frecuencia de emisión máxima, si tiene chirrido o salto de frecuencia.

Es necesario comprobar la energía alimentada no deseada (es decir, la recepción no deseada de la energía del radar dentro del equipo del sistema, evitando la antena de medición). Esta alimentación se comprueba desconectando la antena de medición y terminando la línea de entrada con una carga de 50 Ω . Si esta energía está presente, se pueden ensayar las siguientes opciones:

- comprobar que los soportes del equipo de medición (si hubiere alguno) están sellados;
- comprobar que las fijaciones de los conectores son firmes;
- desplazar el sistema de medición del radar a otro lugar, en el cual el equipo de medición esté apantallado por edificios o follaje con respecto al radar, y en el cual la antena esté levantada por encima de estos obstáculos en el mástil telescópico;
- desplazar el sistema de medición del radar a una mayor distancia del radar.

Un sistema de medición bien diseñado debe minimizar la posibilidad de esta alimentación no deseada.

Paso 3: Determinar los parámetros de emisiones del radar

Los parámetros cuya determinación es la más crítica antes de comenzar la medición son el intervalo de exploración del haz y la anchura de banda de emisión efectiva. El intervalo de exploración del haz y otras características se adquieren sintonizando el analizador de espectro en un modo de intervalo de frecuencia cero y un intervalo de tiempo de barrido de varios segundos, y observando después la exploración del haz del radar.

La determinación de la anchura de banda de emisión se realiza como se describe en el texto principal de este Anexo, sintonizando el analizador de espectro con la frecuencia fundamental del

radar en un modo de intervalo cero, y las anchuras de banda de FI y de vídeo inicialmente fijados a sus valores disponibles más amplios. La anchura de banda de FI se reduce cada vez que los flancos del haz del radar pasan por el sistema de medición, y se observa la anchura de banda en la cual cae el nivel de potencia recibida. Esta es la anchura de banda de medición mayor disponible que es menor que la anchura de banda de emisión del radar. Esta será la anchura de banda de medición utilizada, a menos que las circunstancias dicten otra cosa, por ejemplo la necesidad de observar el radar en una determinada anchura de banda del receptor.

Otros parámetros de emisión del radar que deben ser observados son: velocidad de repetición de impulsos, fluctuación de fase de impulso (si la hubiera), separador de etapas de impulso (si lo hubiere), y anchura de impulso. Los tres primeros parámetros pueden ser medidos en un osciloscopio conectado a la salida vídeo del analizador de espectro. La duración del impulso de RF (puntos de tensión de 50%) y el tiempo de subida (puntos de tensión de 10-90%) deben ser medidos con un potenciómetro de cresta o un diodo detector de RF de anchura de banda adecuado, aplicados en la región de ley cuadrática. Debe estar debidamente adaptado con un osciloscopio que tiene una anchura de banda suficiente para permitir la visualización de la forma de onda del impulso sin distorsión asociada con la anchura de banda del detector limitado.

Paso 4: Calibrar el sistema de medición

Método director controlado manualmente:

- El método controlado manualmente requiere la calibración de cada uno de los componentes de medición o la calibración de todo el montaje de medición.

Método directo controlado automáticamente:

- Véase el Apéndice 2 al Anexo 1. Se recomienda la calibración con diodo de ruido, aunque se pueden utilizar otros métodos que emplean generadores de señales.

Paso 5: Configurar el programa informático del sistema de medición (método automático solamente)

El soporte lógico o programa informático de medición debe estar configurado a la frecuencia de arranque deseada (MHz), la frecuencia de parada (MHz), el tamaño de paso (MHz), el intervalo de paso (MHz), la anchura de banda FI (MHz), la anchura de banda vídeo (\geq anchura de banda de FI), el detector (cresta positiva), el nivel de referencia del analizador de espectro (usualmente -10 dBm), la atenuación inicial en la frecuencia de arranque (normalmente 0 dB) y los datos adicionales, respecto a la ubicación (como nombre del radar, nombre del proyecto de medición, etc.).

Paso 6: Comprobar la linealidad durante la medición

Es crítico mantener la integridad de la medición comprobando la linealidad a medida que la medición avanza. Cuando se mide, tanto en la frecuencia fundamental como en las emisiones no esenciales, la linealidad del sistema debe ser comprobada periódicamente insertando 10 dB de atenuación de RF en el extremo frontal de RF, antes del LNA. El resultado debe siempre ser una caída de 10 dB del nivel de la señal medida. Si se observa una caída distinta de 10 dB, puede ser que se esté produciendo una sobrecarga del extremo frontal o alimentación de señales no deseadas. Un diseño adecuado del sistema minimizará estos posibles problemas. Si se plantean, puede ser necesario tomar medidas adicionales para apantallar el sistema de medición o desplazarse a otra ubicación, como se describe en el Paso 2 anterior.

Paso 7: Medir el radar en varias anchuras de banda de FI (se recomienda pero no se requiere)

Puede ser útil medir las emisiones del radar en varias anchuras de banda. Estas mediciones proporcionan una indicación inequívoca de la variación de la potencia del radar medido en función de la anchura de banda del receptor en cualquier frecuencia dada al espectro.

Apéndice 2 al Anexo 1

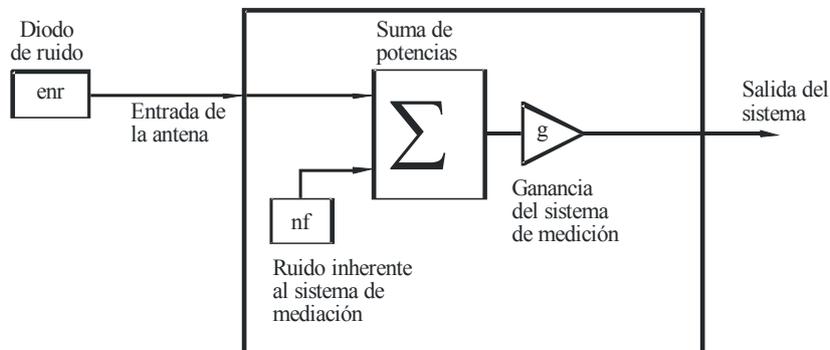
Calibración de la ganancia y factor de ruido mediante un diodo de ruido

El sistema de medición se debe calibrar antes de cada medición del espectro de emisión del radar. A medida que se efectúan las mediciones, se pueden añadir automáticamente correcciones de ganancia a cada punto de datos. Para factores de ruido del sistema de medición de 20 dB o menos, se puede utilizar la calibración del factor Y de diodo de ruido. Este Apéndice describe la teoría y el procedimiento de esta calibración.

La calibración de diodo de ruido de un receptor sintonizado con una frecuencia determinada se puede representar en forma de componentes agrupados, como se muestra en la Fig. 8. En este diagrama, el símbolo Σ representa una función de suma de potencias que añade linealmente cualquier potencia en la entrada del sistema de medición a la potencia de ruido inherente del sistema. El símbolo g representa la ganancia total del sistema de medición. El factor de ruido del sistema de medición es indicado por nf , y el diodo de ruido tiene una relación de ruido en exceso indicada como enr . (En este Apéndice, todas las cantidades algebraicas indicadas por letras minúsculas, tales como « g », representan unidades lineales. Todas las cantidades algebraicas indicadas con letras mayúsculas, tales como « G », representan unidades de decibelios.)

FIGURA 8

Diagrama de componentes agrupados de
la calibración del diodo de ruido



M.1177-08

El factor de ruido es la relación entre la potencia de ruido de un dispositivo n_{device} (W) y el ruido térmico:

$$\frac{n_{device}}{k T B}$$

donde:

- k : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
- T : temperatura del sistema (K)
- B : anchura de banda (Hz).

La relación de ruido excesivo es igual al factor de ruido menos uno, haciendo la fracción de potencia en exceso de $k T B$. El factor de ruido de un sistema se define como $10 \log$ (factor de ruido). Como muchas fuentes de ruido se especifican en forma de relación de ruido excesivo, se puede utilizar esa cantidad.

En la calibración de diodo de ruido, la primera preocupación es la diferencia en la señal de salida cuando el diodo de ruido es activado y desactivado. Para el diodo de ruido = condición activado, la potencia P_{on} (W) viene dada por:

$$P_{on} = (nf_s + enr_d) \times g k T B$$

donde:

nf_s : factor de ruido del sistema

enr_d : enr del diodo de ruido

Cuando el diodo de ruido está desactivado, la potencia P_{off} (W) viene dada por:

$$P_{off} = (nf_s) \times g k T B$$

La relación entre P_{on} y P_{off} es el factor Y :

$$y = \left(\frac{P_{on}}{P_{off}} \right) = \frac{(nf_s + enr_d)}{nf_s}$$

$$Y = 10 \log(y) = 10 \log \left(\frac{P_{on}}{P_{off}} \right) = P_{on} - P_{off}$$

Por tanto el factor de ruido del sistema de medición puede ser resuelto como sigue:

$$nf_s = \frac{enr_d}{y - 1}$$

El factor de ruido del sistema de medición es:

$$NF_s = 10 \log \left(\frac{enr_d}{y - 1} \right) = ENR_d - 10 \log (y - 1) = ENR_d - 10 \log (10^{Y/10} - 1)$$

Por tanto:

$$g = \frac{P_{on} - P_{off}}{enr_d \times k T B}$$

$$G = 10 \log (P_{on} - P_{off}) - 10 \log (enr_d \times k T B)$$

o

$$G = 10 \log \left(10^{P_{on}/10} - 10^{P_{off}/10} \right) - ENR_d - 10 \log (k T B)$$

En las calibraciones de diodo de ruido, la ecuación precedente se utiliza para calcular la ganancia del sistema de medición con respecto a los valores de diodo de ruido medidos.

Aunque la ecuación para NF_s se puede usar para calcular el factor de ruido del sistema de medición, el programa informático puede aplicar una ecuación equivalente:

$$nf_s = \frac{P_{off}}{g k T B}$$

$$NF_s = 10 \log (P_{off}) - 10 \log (g k T B) = P_{off} - G - 10 \log (k T B)$$

y la sustitución de la expresión para ganancia en la ecuación precedente da:

$$NF_s = P_{off} + ENR_d - 10 \log \left(10^{P_{on}/10} - 10^{P_{off}/10} \right)$$

Los valores de ganancia y factor de ruido determinados con estas ecuaciones pueden ser almacenados en tablas de consulta. Los valores de ganancia se utilizan para corregir los puntos de datos medidos frecuencia por frecuencia.

Excluyendo la antena receptora, todo el trayecto de señal es calibrado con una fuente de diodo de ruido antes de la medición del espectro del radar. Se conecta un diodo de ruido a la entrada de la primera línea de RF en lugar de la antena receptora. La conexión se puede hacer manualmente o mediante un relevador automatizado, dependiendo del escenario de medición. El nivel de ruido en el sistema se mide en una serie de puntos a través de la gama de frecuencias del sistema con el diodo de ruido activado. La medición de ruido se realiza con la anchura de banda de FI puesta a 1 MHz y la anchura de banda de vídeo puesta a 1 kHz. Después el diodo de ruido es desactivado y el ruido del sistema se mide como antes, en las mismas frecuencias. El computador del sistema de medición recoge así un conjunto de valores P_{on} y P_{off} en una serie de frecuencias a través de la banda que se ha de medir. Los valores de P_{on} y P_{off} se utilizan para resolver la ganancia y el factor de ruido del sistema de medición en las ecuaciones anteriores.

Apéndice 3 al Anexo 1

Medición de la duración del impulso y de los tiempos de elevación/caída del impulso

1 Introducción

La finalidad de este Apéndice es dar orientaciones para medir los parámetros de impulsos de radar necesarios para aplicar la máscara de emisión en el dominio fuera de banda. La Recomendación UIT-R SM.1541, en su Anexo 8, trata de las emisiones no deseadas en el dominio fuera de banda para sistemas de radar. Para determinar la anchura de banda necesaria, B_n , y la anchura de banda de 40 dB, B_{-40} , se debe medir la anchura del impulso, t , y el tiempo de elevación, t_r , de los radares de impulsos².

La duración del impulso, t , se mide en los puntos de -6 dB (puntos de tensión del 50%) de un impulso de radar. El tiempo de elevación, t_r , o el tiempo de caída, t_f , se mide entre los puntos de $-0,9$ dB y -20 dB (puntos de tensión del 10%-90%) en un borde anterior o posterior del impulso, respectivamente. Para los impulsos codificados, t_r y t_f son el tiempo de elevación/caída de un subimpulso. Si los subimpulsos no son discernibles, cabe suponer que t_r es 40% del tiempo para conmutar de una fase o subfase a la siguiente.

Para algunos diseños de radar, la duración del impulso y el tiempo de elevación o caída pueden ser medidos mediante una conexión de línea a un acoplador direccional. Sin embargo, las características de los impulsos radiados pueden diferir algo de los medidos en acopladores direccionales. Además, algunos diseños de radar no proporcionan un acoplador direccional. Para estos radares, la anchura del impulso y el tiempo de elevación o de caída se pueden medir mediante energía radiada si el sistema de medición tiene anchura de banda suficiente (es decir, que excede de $(1/t_r)$). Un posible impedimento para medir la duración del impulso mediante radiación es el efecto de la energía propagada por trayectos múltiples, que causa una disminución escalonada en el borde posterior de cada impulso radiado. Este efecto puede ser minimizado utilizando una antena de reflector parabólica en el sistema de medición. Si es posible suprimir suficientemente el efecto de propagación por trayectos múltiples para que el primer escalón del borde posterior se produzca a más de 6 dB por debajo del nivel de impulso nominal, es posible una medición radiada de la duración del impulso si se satisface el requisito de anchura de banda para $(1/t_r)$.³ Se requiere un detector de diodo de banda ancha para lograr la anchura de banda suficiente.

² Cuando el tiempo de caída, t_f , del radar es menor que el tiempo de subida, t_r , se debe utilizar en lugar del tiempo de subida al aplicar las ecuaciones de la Recomendación UIT-R SM.1541.

³ Por ejemplo, un impulso de $1 \mu\text{s}$ pudiera tener un tiempo de elevación inferior a $0,1 \mu\text{s}$. Este t_r requeriría una anchura de banda en exceso de 10 MHz para una medición exacta. Se dispone de osciloscopios con anchuras de banda de hasta 2 GHz. Para medir los tiempos de elevación/caída del radar, se deben utilizar osciloscopios con 500 MHz al menos. La anchura de banda debe estar disponible en un modo de un solo tiro (sin muestreo repetitivo), pues las mediciones se hacen en cada impulso de radar.

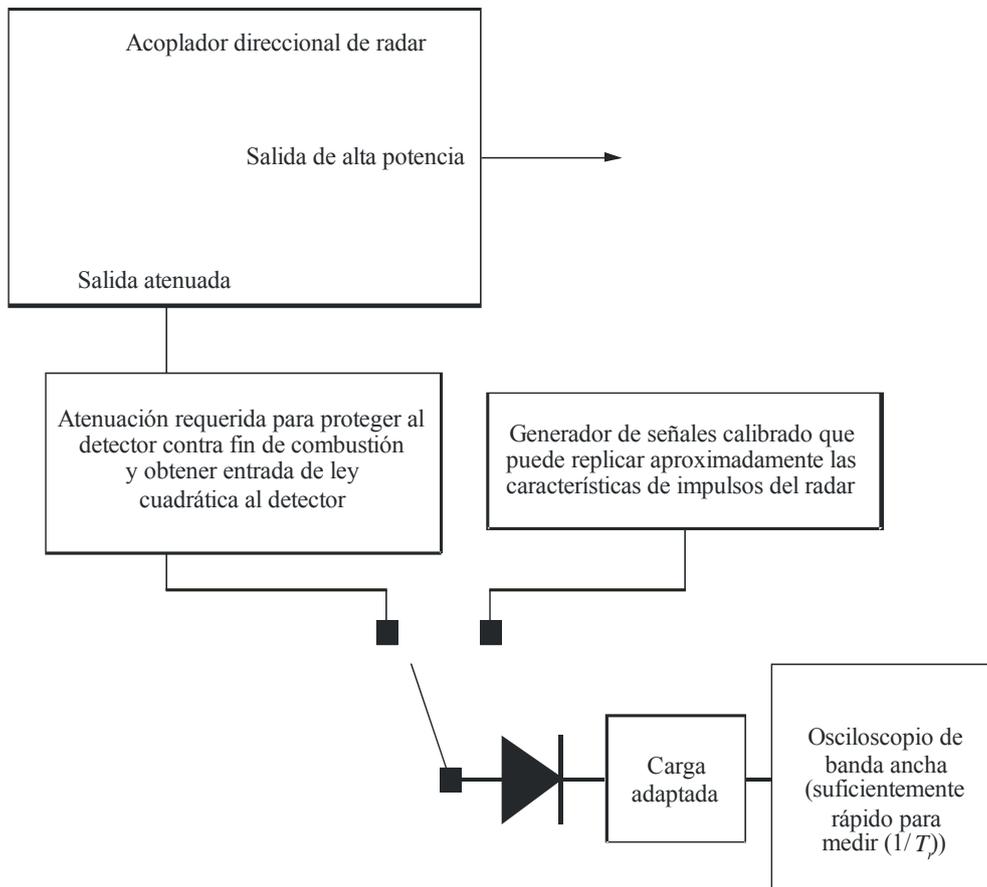
2 Mediciones de radares convencionales

2.1 Mediciones de impulsos acoplados en líneas físicas

Para la medición de las características de impulsos acoplados en líneas físicas, el montaje de la medición se muestra en la Fig. 9. Un cable coaxial de impedancia apropiada se conecta entre la salida del acoplador direccional y la entrada de un detector de cristal de banda ancha (anchura de banda que exceda de $(1/t_r)$). Se inserta un atenuador variable (0-70 dB, por ejemplo) entre el acoplador y el detector. Antes de conectar el detector, el atenuador se fija inicialmente a un nivel suficientemente alto para proteger el cristal contra daños⁴. Se puede suponer que el nivel de entrada máximo admisible del detector sea +20 dBm, si se carece de otros datos.

FIGURA 9

Diagrama de bloques esquemático para medir los parámetros de duración de impulso y tiempo de elevación (o tiempo de caída) del radar mediante una conexión de línea física a un acoplador direccional



M.1177-09

⁴ La fijación inicial del atenuador se puede obtener del nivel de potencia de cresta del radar y de la pérdida de inserción especificada del acoplador direccional.

La salida del detector está conectada a un osciloscopio que tiene una anchura de banda que excede de $(1/t_r)$. Las impedancias deben estar apropiadamente adaptadas; la mayoría de los osciloscopios modernos tienen valores de impedancia de entrada seleccionables. 50Ω suele ser correcto. Se debe utilizar acoplamiento de corriente continua en la entrada del osciloscopio.

El osciloscopio se ajusta para visualizar y registrar⁵ las envolventes de impulsos del radar. La fijación del atenuador variable es observado por el personal de medición.

A continuación, la línea del acoplador direccional del radar se desconecta de ese dispositivo y se conecta de nuevo a la salida de un generador de señales calibrado capaz de producir impulsos de aproximadamente la misma duración de los impulsos medidos del radar. La salida del generador de señales se ajusta para generar una respuesta en amplitud en el osciloscopio que sea igual para ambas envolventes, de preferencia +10 dBm aproximadamente.

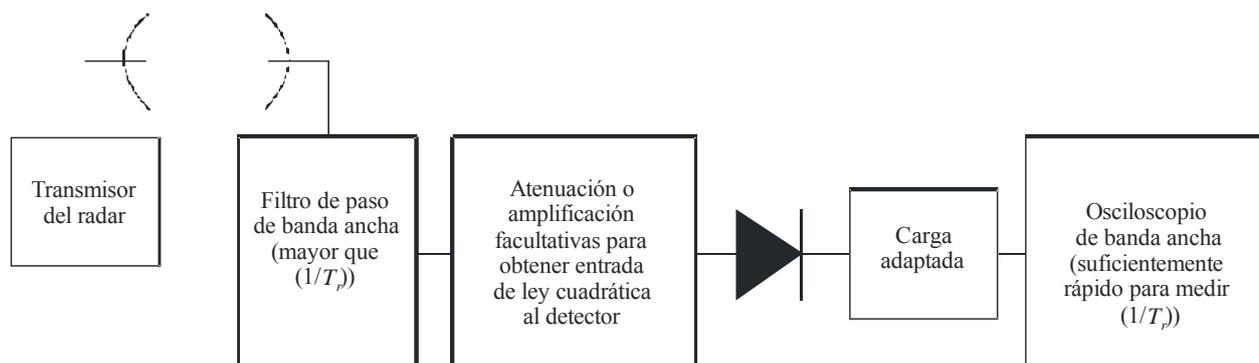
Una vez hecho este ajuste, la respuesta del detector de cristal se puede calibrar como sigue. La salida del generador de señales es reducida, sucesivamente, en 0,9 dB, 6 dB y 20 dB.⁶ En cada uno de estos niveles, se colocan marcadores verticales en la envolvente del impulso medido. Los intervalos de tiempo resultantes entre los marcadores verticales proporcionan la duración del impulso (Δ entre los puntos de 6 dB), el tiempo de subida (Δ entre los puntos de 0,9 dB y 20 dB en el borde anterior), y el tiempo de caída (Δ entre los puntos de 0,9 dB y 20 dB en el borde posterior).

2.2 Mediciones de impulsos acoplados radiados

Para los radares que no incorporan acopladores direccionales, sólo es posible medir las características del impulso utilizando mediciones radiadas. La Fig. 10 muestra la configuración del soporte físico de medición para medir impulsos radiados.

FIGURA 10

Diagrama de bloques esquemático para medir los parámetros de duración de impulso y tiempo de elevación (o tiempo de caída, si es más corto) del radar mediante impulsos radiados



M.1177-10

⁵ La mayoría de los osciloscopios pueden registrar datos en un disco interno o en un computador externo mediante un bus IEEE-488 (GPIB). La grabación se puede hacer también fotografiando la pantalla del osciloscopio con una cámara de cuadro fijo digital.

⁶ Las salidas del detector de cristal no son necesariamente lineales; por tanto, los puntos de tensión de 10%, 50% y 90% para la señal de RF pueden no aparecer como puntos de tensión de 10%, 50% y 90% en la salida de corriente continua del detector. Se necesita un generador de señales calibrado para determinar las tensiones de salidas de corriente continua reales para estas tensiones de entrada.

Se utilizará el siguiente procedimiento:

Paso 1: Colocar el sistema de medición en un lugar con trayecto de visibilidad directa clara hacia la antena del transmisor de radar, y lo más cerca posible sin degradar el funcionamiento del sistema de medición (por ejemplo, alimentación), perdiendo potencia del radar al pasar por debajo del haz principal, o estando dentro de la distancia de campo cercano de la antena del radar o de la antena de medición.

Paso 2: Utilizar una antena de alta ganancia (por ejemplo, una parábola de 1 m de diámetro o mayor en frecuencias de microondas) en el sistema de medición para recibir los impulsos del radar con la amplitud mayor posible y discriminar con respecto a las señales de otros transmisores.

Paso 3: En la entrada de la antena de medición, instalar un filtro de paso de banda que pasará la energía de la frecuencia fundamental del radar y que tiene una anchura de banda que excede de $(1/t_r)$ de los impulsos del radar que se ha de medir. Después del filtro de paso de banda, instalar un detector de diodo con una anchura de banda y velocidad de respuesta de tiempo de elevación que excedan de $(1/t_r)$ de los impulsos del radar que se ha de medir⁷.

Paso 4: Conectar la salida del detector a la entrada de un osciloscopio. La impedancia de salida del detector debe estar adaptada a la impedancia de entrada del osciloscopio. El osciloscopio debe tener una anchura de banda que exceda de $(1/t_r)$ de los impulsos del radar que se ha de medir. Fijar el osciloscopio al modo de un solo barrido, con un umbral de activación suficientemente bajo para asegurar que se capturan los impulsos del radar. Esperar hasta obtener la grabación de una serie de impulsos. Elevar el umbral de activación y esperar otro conjunto de impulsos para activarlo. Continuar este proceso hasta que el umbral sea suficientemente alto para que no se registren más impulsos. Reducir ligeramente el umbral de activador y esperar la grabación de una secuencia. Esta secuencia de impulsos muestra la velocidad de repetición de impulsos.

Paso 5: Medir la duración del impulso y el tiempo de elevación o el tiempo de caída en el osciloscopio utilizando los criterios especificados anteriormente para las mediciones de impulsos acoplados en líneas físicas.

2.3 Notas sobre el procedimiento de medición de impulsos radiados

La colocación del sistema de medición muy cerca del radar, con visibilidad directa clara, minimiza los problemas de propagación por trayectos múltiples y maximiza la potencia recibida en los impulsos. La utilización de una antena de medición de alta ganancia mitiga aún más el problema de propagación por trayectos múltiples y aumenta el nivel de potencia del impulso recibido.

Se ha de tener cuidado de asegurar que todos los elementos del sistema de medición tengan características de anchura de banda y respuesta temporal suficientes para medir el tiempo de elevación del impulso del radar. Probablemente se necesitan detectores de diodo con características de respuesta rápida para satisfacer este requisito.

En entornos con múltiples radares, o en entornos con fuertes señales que no son de radar y que están en o cerca de los bordes de la banda del espectro del radar que se mide, puede ser necesario tomar medidas para aislar los impulsos del radar medido con respecto a otras señales. El uso de una antena parabólica para radares de frecuencias de microondas y también un filtro de paso de banda en los terminales de la antena de medición ayudará a aislar las formas de onda de los impulsos deseados. Si estos elementos no son adecuados para aislar los impulsos deseados, la activación dependiente de

⁷ La potencia de entrada de cresta al detector debe caer dentro de la región de respuesta de ley cuadrática. Para obtener el nivel de entrada de potencia apropiado, puede ser necesario instalar un atenuador o un amplificador entre el filtro de paso de banda y el detector de diodo.

la amplitud proporcionaría el aislamiento necesario suponiendo que los impulsos de radar medidos tienen mayor amplitud en el sistema de medición que cualquier otra señal en el entorno.

3 Mediciones de radares de tecnología avanzada

3.1 Mediciones de impulsos acoplados en líneas físicas

En este contexto, los radares avanzados son los que utilizan modulación de impulsos. La frecuencia o la fase puede ser modulada. Si se utiliza MF (chirrido), se pueden utilizar las mismas técnicas de medición especificadas anteriormente, pero la anchura de banda de medición debe ser igual o mayor que toda la gama de frecuencias con chirrido. En la práctica, esto puede requerir el uso de un detector de diodo de banda ancha.

Las mediciones del tiempo de elevación en impulsos con chirrido son iguales que para impulsos sin chirrido, y se puede utilizar el mismo procedimiento especificado anteriormente.

Relación de compresión de impulsos (sistemas de impulsos MF): A continuación se describen las mediciones para determinar la compresión de impulsos. Este método es adecuado para determinar la compresión de impulso para todos los radares, incluidos los sistemas avanzados.

Para impulsos de radar codificados en fase, la medición de la duración del impulso se efectúa también como se especifica anteriormente, pero puede ser difícil medir el tiempo de elevación de cada segmento de fase (chips). La primera dificultad se plantea con la codificación en fase ordinaria, en la cual un cambio de fase de π puede ocurrir entre cada segmento. Aunque la fase es desplazada, el valor cuadrático de la forma de onda se observa a la salida del detector, borrando la información de fase. Esto hace que los bordes de los segmentos sean inobservables, en principio, con un detector de cualquier clase.

En la aplicación, pueden ocurrir transitorios en las transiciones de fase entre los segmentos, y estos transitorios son visibles en un osciloscopio, pero la observación de las transiciones de segmentos no resulta en una medición del tiempo de subida del segmento.

Número total de subimpulsos dentro de cada impulso (sistemas codificados en fase): Los radares que emplean desplazamiento de fase convencional con conmutación instantánea de $\pm 180^\circ$ presentarán normalmente transitorios que pueden ser observados en las envolventes de los impulsos detectados. De esta manera, se puede determinar el número de segmentos en cada impulso. Sin embargo, para sistemas de radar que emplean modulación por desplazamiento mínimo (MDM) u otras tecnologías con desplazamiento de fase, es imposible determinar el número de segmentos dentro de cada impulso midiendo la envolvente del impulso detectado. Para estos radares, si no se dispone de un par de conexiones de líneas físicas para supervisar los canales I y Q, sólo es posible determinar el número de segmentos utilizando materiales de referencia, tales como manuales técnicos, manuales operativos y hojas de especificaciones.

Medición del tiempo de elevación del segmento: Para los impulsos codificados en fase ordinarios, el tiempo de elevación del segmento sólo se puede medir directamente si la forma de onda es muestreada antes de la detección. Esto se puede hacer conectando una salida de FI⁸ de un analizador de espectro a un analizador de señales vectorial o un dispositivo de procesamiento de señales digitales similar.

⁸ Se supone que la salida FI esté acoplada desde el analizador de espectro antes de las etapas de anchura de banda de detección y resolución, de modo que se mantiene la anchura de banda adecuada para una medición del tiempo de elevación del impulso.

Los impulsos codificados en fase avanzados no emplean cambios de fase discontinuos entre segmentos. En cambio, utilizan MDM. Con la modulación MDM, el requisito para observar el tiempo de elevación del segmento es separar los componentes I y Q del impulso, y observar el tiempo de elevación de cada componente individualmente. Esto se puede hacer con un analizador de señales vectorial (VSA, *vector signal analyser*) debidamente programado (o un procesador de las señales digitales (DSP) especializado o un circuito lógico programable por campo (FPGA)) que alimentan la salida de FI de un analizador de espectro.

Si una organización de medición no dispone del equipo sensible a la fase descrito anteriormente (VSA, DSP o FPGA con el programa informático instalado apropiado), la medición del tiempo de elevación del impulso se puede efectuar en el borde del impulso en vez de una medición directa del tiempo de elevación del segmento. La medición del tiempo de elevación se efectúa como se describe anteriormente. Si se hace esto, se debe señalar el hecho en el conjunto de datos resultante.

3.2 Mediciones de impulsos acoplados radiados

En los radares avanzados que carecen de un acoplador direccional (tal como los sistemas que emplean múltiples módulos de transmisor), las características del impulso deben ser medidas de manera radiada, como se describe anteriormente. Se ha de tener cuidado de mantener la anchura de banda adecuada para la medición del tiempo de elevación del impulso, y la entrada del detector de diodo debe estar en una amplitud que esté en la respuesta de ley cuadrática del detector.

3.3 Uso de materiales de referencia para determinar las características del impulso

Cabe suponer que los manuales operativos, las hojas de especificaciones y otras referencias específicas del radar son razonablemente exactas para el conjunto de todos los radares dentro de una determinada línea o serie de producción de modelos, aunque se ha de reconocer que cada radar puede variar algo con respecto al promedio de producción. Esta variación se produce como resultado de la variación de la calidad en la fabricación y del mantenimiento del radar en el terreno. Si no es posible medir directamente una o más de las características del impulso requeridas, se pueden utilizar los valores de parámetros citados en esta referencia para los cálculos de las máscaras de emisión.

Apéndice 4 al Anexo 1

Cálculo de los factores de corrección de la ganancia para una red planar de antenas utilizando un programa informático escrito en BASIC

Este programa, escrito en BASIC, tiene por objeto determinar el campo lejano a partir de mediciones del campo cercano. Utiliza únicamente las consideraciones de cambios de fase de la onda recibida debidos a la diferencia entre el frente de onda en RF esférico y la red planar de antenas. Por consiguiente, el programa se debe utilizar únicamente para determinar el eje de puntería o la máxima ganancia de antena en el infinito a partir de mediciones del campo cercano. No se considera el diagrama de ganancia de antena.

```
'Test data for error -.025 pi radians ; error ~.3 dB
'freq = 3000
'l = 10
'd = 1
'
CLS
'
INPUT «Indicar la frecuencia de la antena en MHz»; freq
INPUT «Indicar ahora la distancia de medida con respecto a la antena en metros»; l
INPUT «Indicar la dimensión máxima de la antena en metros»; d
'
'
'
CONST c = 300
CONST pi = 3.141592654#
'
'
lamda = c / freq
num = 100
'
'
```

```

IF d < (5 * lamda) THEN
    PRINT «Las dimensiones de la antena deben ser mucho mayores (* 5) que»;
    PRINT «la longitud de onda para una utilización precisa de este programa»
    STOP
END IF
'sum of inphase and quadrature field elements
sumi = 0
sumj = 0
'
' system is symmetrical so integrate from 0 to d/2
FOR i = 0 TO num - 1
    dprime = i * d / (2 * (num - 1))
    phasediff = (1 - ((1 ^ 2) + (dprime ^ 2)) ^ .5) * 2 * pi / lambda
    PRINT «La diferencia de fase es»;
    PRINT USING «##.##»; phasediff;
    icomp = COS(phasediff)
    sumi = sumi + icomp
    jcomp = SIN(phasediff)
    sumj = sumj + jcomp
NEXT i
PRINT «El error de fase máximo es»;
PRINT USING «##.##»; phasediff / pi;
PRINT «* pi radianes»
'form final received planar power received from spherical RF wave
res = ((sumj) ^ 2 + (sumi) ^ 2) ^ .5
'PRINT «El resultado es»; res; «i es»; i; «el número es»; num
'Calc gain reduction
gprime = num / res
'
glog = 20 * (LOG(gprime) / LOG(10#))
PRINT «La reducción de ganancia de un campo prolongado al infinito es»;
PRINT USING «##.###»; glog;
PRINT «dB»
END

```

Anexo 2

Medición de emisiones no deseadas de sistemas de radar según se indica en los *recomienda 2 y 3*

1 Introducción

Las técnicas recomendadas se denominan directa e indirecta. El método de medición directa mide exactamente las emisiones no deseadas de radares (según se detalla en los *recomienda 2 y 3*) gracias a la medición en el espacio libre de las señales radiadas. El método indirecto mide las señales a la salida del transmisor y las combina con modelos del sistema subsiguiente para estimar las intensidades de campo en el espacio libre. La comparación de las dos técnicas ha mostrado tener una estrecha correlación, dentro de 2 dB.

2 Anchura de banda de referencia

En general, las reglas para determinar la anchura de banda de referencia para radares de frecuencias más altas (Anexo 1) se utilizan también para radares de frecuencias más bajas, aplicando la escala adecuada a los parámetros de forma de onda.

Para los sistemas de radar, la anchura de banda de referencia, B_{ref} , utilizada para definir los límites de emisiones no deseadas (Recomendaciones UIT-R SM.329, UIT-R SM.1541 y el Apéndice 3 al RR) se debe calcular para cada sistema de radar. Para los tres tipos generales de modulación por impulsos de radares empleados para radionavegación, radiolocalización, adquisición, seguimiento y otras funciones de radiodeterminación, los valores de la anchura de banda de referencia se determinan utilizando las siguientes fórmulas:

- para radares sin codificación por impulsos de frecuencia fija, se divide entre la longitud de impulso del radar, (s) (por ejemplo, si la longitud de impulsos de radar es 100 μ s, la anchura de banda de referencia es 1/100 μ s = 10 kHz);
- para radares de impulsos codificados en fase de frecuencia fija, se divide entre la longitud de segmento codificado en fase, (s) (por ejemplo, si la longitud del segmento codificado en fase es 200 μ s, la anchura de banda de referencia es 1/200 μ s = 5 kHz);
- para radares de barrido de MF o de chirrido, la raíz cuadrada de la cantidad obtenida dividiendo la anchura de banda del chirrido (MHz) entre la longitud del impulso, (μ s) (por ejemplo, si la MF está comprendida entre 1250 MHz y 1251 MHz o 10 kHz durante el impulso de 20 ms, la anchura de banda de referencia es (10 kHz/20 ms)^{1/2} = 700 Hz).

En todos los casos, cuando las anchuras de banda son superiores a 1 MHz, se debe utilizar una anchura de banda de referencia, B_{ref} , de 1 MHz.

3 Medición de la anchura de banda y parámetros del detector

La anchura de banda de medición, B_m , se define como la anchura de banda de impulsos del receptor y es mayor que la anchura de banda de FI, B_{if} (algunas veces denominado como anchura de banda de resolución para los analizadores de espectro). La anchura de banda de medición, B_m , se puede obtener de la siguiente ecuación:

$$B_m = B_{if} \times MBR$$

Es necesario determinar la relación de MBR para el receptor de medición que se utiliza. La anchura de banda de medición es aproximadamente 3/2 para un filtro gaussiano de anchura de banda de FI de -3 dB que se suele utilizar en muchos receptores de analizadores de espectro comerciales.

NOTA 1 – En algunos instrumentos la anchura de banda de FI se define en el punto de -6 dB.

Se debe seleccionar una anchura de banda de FI de receptor apropiado para que dé una de las siguientes anchuras de banda de medición recomendadas. (En general, las reglas para determinar la anchura de banda de referencia para radares de frecuencias más altas (véase el Anexo 1) se utilizan también para radares de frecuencias más bajas, aplicando la escala adecuada a los parámetros de forma de onda.)

- Medición de anchura de banda⁹
- $\leq (1/T)$ para radares sin codificación por impulsos de frecuencia fija, siendo T la longitud del impulso. (Por ejemplo, si la longitud del impulso del radar es $100 \mu\text{s}$, la anchura de banda de FI de medición debe ser $\leq 1/(100 \mu\text{s}) = 10 \text{ kHz}$.)
 - $\leq (1/t)$ para radares de impulsos codificados en fase de frecuencia fija, siendo t la longitud del segmento codificado en fase. (Por ejemplo, si un radar transmite impulsos de $260 \mu\text{s}$, cada uno de ellos consistente en 13 segmentos codificados en fase de $20 \mu\text{s}$ de longitud, la MBR de FI debe ser $\leq 1/(20 \mu\text{s}) = 50 \text{ kHz}$.)
 - $\leq (B/T)^{1/2}$ para radares de barrido de frecuencia (MF, o de chirrido), siendo B la gama del barrido de frecuencia durante cada impulso y T la longitud del impulso. (Por ejemplo, si el radar realiza un barrido (chirrido) a través de la gama de frecuencias $1\ 250\text{-}1\ 251 \text{ MHz}$ ($= 10 \text{ kHz}$ de espectro) durante cada chirrido y si la longitud del chirrido impulso es de 20 ms , la MBR de FI debe ser $\leq (10 \text{ kHz}/20 \text{ ms})^{1/2} = \sqrt{0,5} \text{ kHz} \approx 700 \text{ Hz}$.)

4 Gama dinámica del sistema de medición

El sistema de medición debe ser capaz de medir los niveles de emisiones no deseados indicados en el Apéndice 3 al RR. Para obtener una visión completa del espectro especialmente en el dominio de emisiones no esenciales, se recomienda poder medir niveles de emisiones 10 dB por debajo de los niveles indicados en el Apéndice 3 al RR.

Para un elevado nivel de confianza de los resultados, la gama dinámica de medición del sistema debe ser considerablemente más alta que la gama de medición requerida (margen (2) en la Fig. 2).

La relación entre la gama de medición requerida y la gama de medición recomendada del sistema de medición se muestra en la Fig. 2.

5 Método directo

Se puede utilizar un método directo, que se describe a continuación, para medir las emisiones no deseadas (fuera de banda) y no esenciales (de sistemas de radar de gran longitud de onda) que permiten el fácil acceso al haz principal del radar. Por ejemplo, la antena o los elementos de antena están situados en el suelo y polarizados verticalmente. Este método ha sido utilizado para medir las

⁹ Las correcciones asociadas con transformaciones de anchura de banda de medición a anchura de banda de referencia y PEP examinadas en el § 3 del Anexo 1, se aplican también a los radares de gran longitud de onda descritos en el Anexo 2.

características de emisiones de sistemas de radar de gran longitud de onda que funcionan en frecuencias de hasta 45 MHz y p.i.r.e. en la gama de megavatios.

5.1 Soporte físico y soporte lógico de medición

5.1.1 Antena

La Fig. 11 es un diagrama de bloques del tipo de sistema de medición requerido para los dos métodos directos. El primer elemento que se ha de considerar en el sistema es la antena de recepción, que debe tener una respuesta en frecuencia de banda ancha, por lo menos tan amplia como la gama de frecuencias que se ha de medir. Esto puede requerir el uso de pantallas en el suelo. La ganancia no suele ser un problema, por lo que una simple antena de látigo con pantalla en el suelo es adecuada. Puede ser necesario calibrar la ganancia de la antena para la medición de banda ancha. Esto se puede lograr utilizando una fuente de referencia y una segunda alimentación de la antena (deficientemente adaptada) en un potenciómetro.

La antena debe estar situada en el campo lejano, si es factible, por ejemplo, a 20 MHz, mayor que 1 km, aunque la medición de la caracterización espectral ha mostrado que no hay diferencia discernible en las mediciones de campo lejano y campo cercano. Muchos radares de gran longitud de onda son elementos de antena que sintetizan un haz que es orientable electrónicamente. En este caso, el haz debe ser orientado o la antena de medición debe estar colocada de modo que esté lo más cerca posible a la cresta del haz principal.

La polarización de la antena se selecciona para maximizar la respuesta a la señal del radar.

El cable que conecta la antena de medición con el sistema de medición puede ser un cable coaxial normal.

5.1.2 Asesor de canal claro

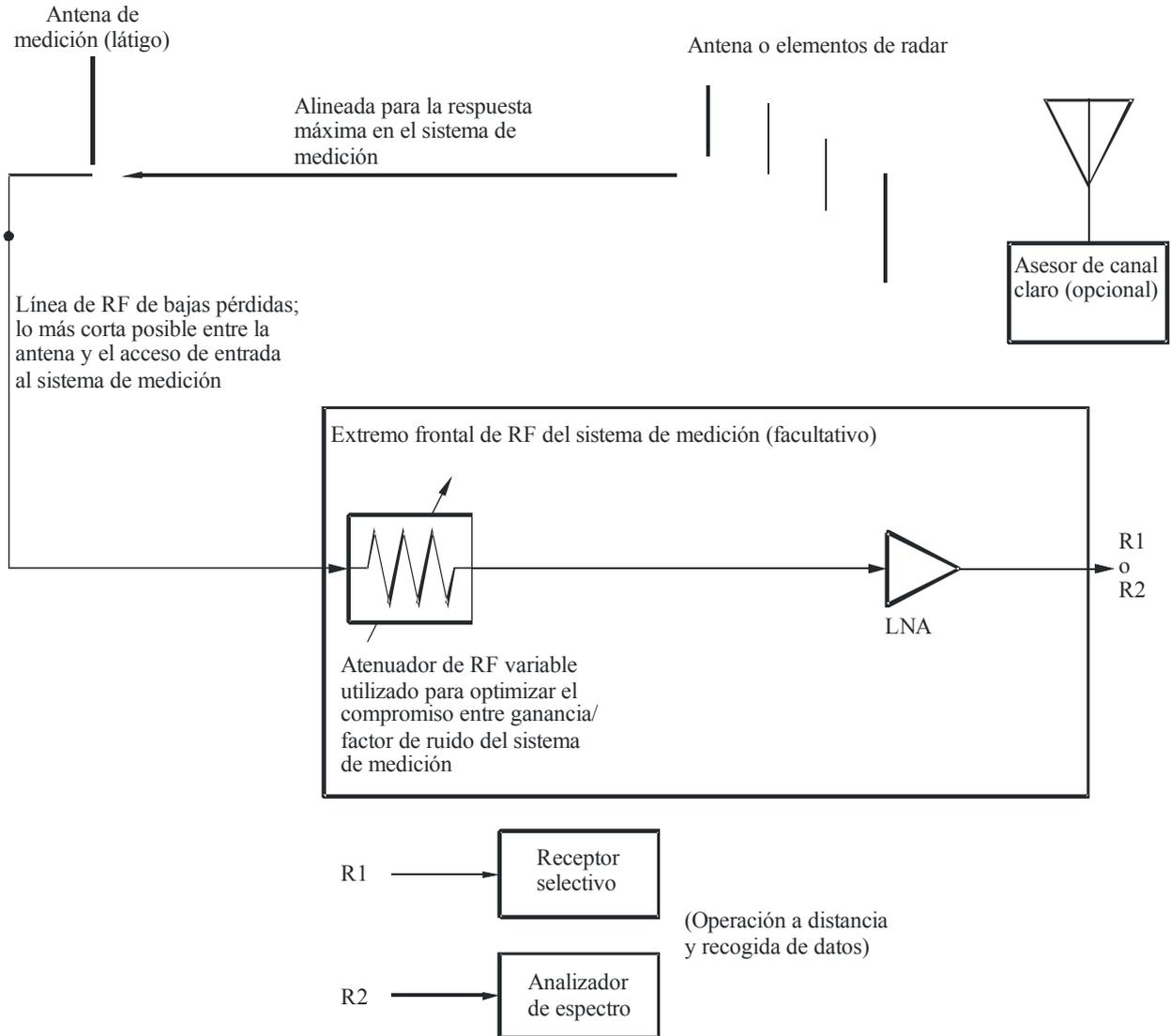
Como las transmisiones de gran longitud de onda que se propagan por la ionosfera pueden viajar largas distancias, y gran parte del espectro que se mide por la antena de prueba estará, en general, expuesto a señales externas, es importante disponer de un dispositivo que informe sobre los canales ocupados, de preferencia un dispositivo que pueda capturar estos datos y dar alguna indicación de la intensidad de la señal. Para esto se puede utilizar el sistema que mide el espectro, o un sistema receptor independiente. Estos datos pueden ser usados para ajustar las emisiones no deseadas que pueden haber sido causadas por fuentes externas. Se debe utilizar también para detectar un canal claro para la prueba dentro de los dominios B_{-40} en banda y fuera de banda.

5.1.3 Extremo frontal de RF

El extremo frontal de RF ejecuta dos funciones. La primera es proteger el extremo frontal del sistema de detección mediante el uso de atenuación de RF variable. El segundo es la preamplificación de bajo nivel de ruido para proporcionar la máxima sensibilidad a emisiones de baja potencia. El atenuador de RF es el primer elemento del extremo frontal. Proporciona atenuación variable (por ejemplo, 0-70 dB) en incrementos fijos (por ejemplo, 10 dB/paso de atenuador).

FIGURA 11

Diagrama de bloques para la medición de emisiones no deseadas radiadas de radares con el método directo controlado manualmente



M.1177-11

5.1.4 Sistema de medición controlado manualmente

La medición controlada manualmente consiste en barrer a través del espectro en incrementos fijos (igual a la anchura de banda medida). En cada barrido de frecuencia, el atenuador puede ser ajustado para mantener la potencia de cresta del radar dentro de la gama dinámica de los otros elementos del sistema de medición (a menudo el amplificador de extremo frontal y el amplificador logarítmico de analizador de espectro son los elementos limitadores). Con el atenuador de RF de extremo frontal debidamente ajustado en cada barrido, se efectúa una medición de la potencia de radar en esa frecuencia.

El elemento final en el extremo frontal de RF es un LNA, instalado como el siguiente elemento en el trayecto de la señal después del preselector. La característica de entrada de bajo nivel de ruido del LNA proporciona alta sensibilidad a emisiones de radar no esenciales de baja amplitud y su ganancia tiene en cuenta el factor de ruido del resto del sistema de medición (por ejemplo, una longitud de línea de transmisión y un analizador de espectro/receptor selectivo).

La sensibilidad y gama dinámica del sistema de medición son optimizados por la selección adecuada de las características de ganancia y factor de ruido del LNA. Es conveniente minimizar el factor de ruido a la vez que se proporciona ganancia suficiente para tener en cuenta todos los circuitos de medición después del LNA (esencialmente la atenuación de línea de RF después del extremo frontal, más el factor de ruido de los circuitos del analizador de espectro/receptor selectivo). Idealmente, la suma de la ganancia y el factor de ruido del LNA (que es el ruido excesivo producido por el LNA con una terminación de $50\ \Omega$ en su entrada) debe ser aproximadamente igual al factor de ruido del sistema de medición restante. Por ejemplo, supongamos que el factor de ruido del analizador de espectro es 25 dB y la atenuación de la línea de RF entre el extremo frontal de RF y el analizador es 5 dB. Por tanto, el LNA del extremo frontal debe acomodar un factor de ruido total de 30 dB. La suma de la ganancia y del factor de ruido del LNA en este ejemplo debe ser pues de 30 dB. Una combinación para este LNA sería un factor de ruido de 3 dB y una ganancia de 27 dB.

Se prevé que el resto del sistema de medición de RF sea un analizador de espectro disponible en el mercado o un analizador de espectro con un preselector o un receptor selectivo. Se puede utilizar cualquier equipo capaz de recibir señales en la gama de frecuencia de interés. Las mediciones han sido realizadas con modernos receptores digitales que satisfacen fácilmente los requisitos de frecuencia y gama dinámica, obviando considerablemente la necesidad de atenuación o ganancia en el extremo frontal.

6 Método indirecto

En el método indirecto, las mediciones se hacen acoplando la salida de cada transmisor. El aparato de medición es similar al método directo a partir de ese punto. Si hay múltiples transmisores, se debe registrar la amplitud compleja, y después las señales deben ser combinadas juntas en el programa informático teniendo en cuenta la ponderación de los elementos orientadores del haz y los retardos del alimentador.

Los datos se pueden recoger fácilmente mediante la conexión del analizador de espectro o receptor a un computador portátil a través de un GPIB o interfaz equivalente.
