

RECOMENDACIÓN UIT-R M.1314-1*

**Reducción de las emisiones no deseadas de los sistemas de radar
que funcionan por encima de 400 MHz**

(Cuestión UIT-R 202/8)

(1997-2005)

Cometido

En esta Recomendación se suministra información sobre los factores de diseño que afectan a las emisiones no deseadas de los transmisores de radar que deben tenerse en cuenta durante el diseño de radares. Se recomienda también que se utilicen, cuando sea posible, ciertos tipos de dispositivos de salida del transmisor para reducir al mínimo las emisiones no deseadas.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que el espectro radioeléctrico utilizable por el servicio de radiodeterminación es limitado;
- b) que el servicio de radionavegación es un servicio de seguridad, como indica el número 4.10 del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) y que, además, algunos otros tipos de sistemas de radar, tales como los radares meteorológicos, pueden efectuar funciones relacionadas con la seguridad de la vida humana;
- c) que la anchura de banda necesaria de las emisiones de las estaciones de radar del servicio de radiodeterminación es grande, a fin de que estas estaciones puedan efectuar correctamente su función;
- d) que los nuevos sistemas basados en técnicas emergentes pueden utilizar tecnologías digitales u otras que son más sensibles a la interferencia de las emisiones no deseadas de radares debido a la elevada potencia de cresta de éstos;
- e) que el UIT-R está estudiando el tema de la utilización eficaz del espectro radioeléctrico por los sistemas de radar;
- f) que las emisiones no deseadas de los sistemas de radar pueden causar en ciertos casos una interferencia a los sistemas de otros servicios de radiocomunicación que funcionan en bandas adyacentes y armónicamente relacionadas;
- g) que el Apéndice 3 del RR especifica los máximos niveles de potencia permitidos para las emisiones no esenciales o las emisiones en el dominio no esencial y que la Recomendación UIT-R SM.1541 especifica los límites de las emisiones fuera de banda para los radares de radiodeterminación,

* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de la Organización Marítima Internacional (OMI), de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), del Comité Internacional Radiomarítimo (CIRM), de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y de las Comisiones de Estudio 1 y 9 de Radiocomunicaciones.

recomienda

- 1 que para reducir las emisiones no deseadas se utilice la información sobre los factores de diseño del transmisor de radar que afectan a las características de las emisiones no deseadas de los mismos que figura en el Anexo 1;
- 2 que se utilicen, cuando sea posible, la mejor tecnología disponible de dispositivos de salida de radar para reducir los niveles no armónicos de las emisiones no esenciales de radar;
- 3 que se utilicen, en caso necesario y cuando sea posible, filtros de salida de radar para reducir las emisiones no deseadas de radar.

Anexo 1**Reducción de las emisiones no deseadas de los sistemas de radar****1 Introducción**

Para hacer máxima la eficacia futura de la utilización del espectro, los transmisores de radar deben elegirse, diseñarse y construirse de forma que la emisión espectral tenga una caída lo más rápida posible, dadas las limitaciones en cuanto a comportamiento del radar, su tamaño, su coste, su peso, su fiabilidad, su capacidad de mantenimiento, etc. La tasa de caída de la curva de emisión espectral (características de la emisión fuera de banda) y el nivel mínimo de la emisión (emisiones no esenciales) vienen determinados por los circuitos y la arquitectura del transmisor, así como por el tipo de onda transmitida. A continuación se examinan estos factores.

2 Factores de diseño de radares

La función o misión de un radar determina en gran medida el diseño del mismo. Las emisiones de un radar son muy variadas (entre ellas, la navegación, la observación meteorológica, la determinación de la velocidad del viento, la vigilancia, la obtención de imágenes y cartografía, el seguimiento del terreno, el altímetro, etc.) y requieren, en general, características de funcionamiento exclusivas. Estas misiones determinan algunos parámetros que no están bajo el control del diseñador del radar los cuales repercuten directamente en factores de diseño del radar, tales como la potencia del transmisor requerida, la selección de la forma de onda y del dispositivo de salida del transmisor, la ganancia de antena en sensibilidad del receptor, la resolución en distancia y azimut y la cobertura Doppler. El compromiso adecuado entre los factores de diseño del radar para mejorar el control del espectro de emisión es un aspecto clave en la mejora de la compatibilidad entre los sistemas de radar y otros servicios.

3 Selección y conformación del tipo de onda

La elección del tipo de onda por impulsos y la manera en que se conforma ésta también puede tener una influencia importante en el control del espectro y de ahí en la compatibilidad. La mayoría de los radares, especialmente los que utilizan un único oscilador de potencia o amplificador de potencia, están limitados por consideraciones de eficacia de energía y disipación del calor, para utilizar impulsos con amplitud prácticamente constante, excepto durante breves transiciones en sus

impulsos. Ello limita los tipos de onda que pueden elegirse. No obstante, aún cuando se aplique esa limitación, las opciones restantes pueden provocar un efecto importante en el espectro de emisión.

Los tipos de onda de radar pueden clasificarse en el primer nivel como de impulso plano o de impulso no modulado (con el designador de emisión «P0») y ondas con modulación dentro del impulso. Dicha modulación sirve generalmente para implementar la compresión de impulsos, aunque se da la excepción del caso de tipos de ondas utilizados para atacar sistemas de antenas con dirección por frecuencias. La modulación dentro del impulso puede a su vez dividirse en las subcategorías siguientes:

- impulsos continuos MF o por «segmentos»;
- impulsos de segmentos escalonados;
- impulsos escalonados en frecuencia, utilizados en los radares dirigidos por frecuencia;
- impulsos discretamente codificados.

Desde el punto de vista del control de la emisión espectral, un principio rector en la selección y conformación de un tipo de onda es el de eliminación de discontinuidades en todas las posibles derivaciones de la onda, pues ello determina la pendiente de caída final del espectro, en dB/década de desviación de la frecuencia. Los diversos tipos de onda impulsiva se distinguen de esta manera por las diferencias entre sus transiciones de amplitud, fase y frecuencia dentro del impulso.

Todas las ondas impulsivas, evidentemente, contienen rampas de elevación y de caída en la envolvente general. Siendo los demás parámetros iguales, conviene tener rampas de elevación y caída graduales y suaves. No obstante, no todos los demás parámetros son siempre iguales. En particular, los impulsos generados en dispositivos de campo transversal han de tener rampas de elevación rápidas para evitar la excitación de modos oscilatorios espurios que empeorarían el espectro. Cuando se utilizan amplificadores con dispositivos distintos de los de campo transversal, las rampas de subida suaves y graduales ayudan a controlar el espectro. Dicha implementación podría aún así ser difícil porque la disipación en el amplificador de potencia suele ser elevada, cuando los amplificadores no se excitan en un punto cercano de la saturación; ello puede dar lugar a la utilización de rampas de elevación y de caída rápidas, aún cuando las oscilaciones espurias no constituyan un problema.

La modulación de frecuencia continua o los tipos de onda por segmentos con una relación de compresión de impulsos o un producto anchura de banda-anchura de impulso elevado presentan índices de caída espectral muy agudos. Ello se aplica a los tipos de onda MF lineales y no lineales. La contribución principal de las componentes espectrales no deseadas de estos tipos de onda se produce al utilizar rampas de elevación cortas en los impulsos.

Los tipos de onda de segmento escalonado tienen frecuencias individuales constantes que aumentan o disminuyen de forma monótona a lo largo del impulso. Pueden considerarse como un subconjunto de la modulación por segmentos con frecuencia continua. No obstante, las formas de onda de segmento escalonado así como las de frecuencia escalonada no monótona que se utilizan con sistemas de antena controlados en frecuencia presentan espectros de emisión peores que los de las formas de onda por segmentos MF continuos. Ello es consecuencia de las discontinuidades en el tipo de onda. Podría ser factible eliminar estas discontinuidades implementando la modulación por segmentos escalonados de forma que se mantenga la continuidad de la fase en las uniones entre escalones de frecuencia. No obstante, aún en ese caso, las discontinuidades de la primera derivada que no aparecen en las formas de onda MF continuas auténticas permanecerán, de forma que el espectro no será tan bueno como el de un impulso MF continuo con una relación de compresión de impulsos comparable.

También hay ciertos tipos de onda con codificación polifase de las que es prototipo la onda de codificación polifase de Frank que se aproxima efectivamente a los tipos de onda de segmentos, es decir, se aproxima a tipos de onda «codificados continuamente»¹. No obstante, estos tipos de onda contienen escalones abruptos de fase, de forma que su espectro no cae tan rápidamente como los de las formas de onda por segmentos MF continuos.

Aquí, las formas de onda de radar con codificación discreta se refieren a las que no se asemejan en forma alguna a los tipos de onda MF continua. Como se excluyen las de codificación polifase, las formas de onda de radar codificadas más discretamente pueden dividirse a su vez en tipos de codificación bifase y de codificación por frecuencia. Los tipos de onda de cada una de estas categorías pueden utilizar códigos Barker y códigos de secuencia binaria pseudoaleatoria.

A falta de otros perfeccionamientos, los tipos de onda con codificación de fase discreta, presentan transiciones abruptas entre «segmentos» de fase constante (lo mismo se aplica a los códigos de Frank y a otros códigos polifase). Como consecuencia de ello, su espectro cae sólo a 20 dB/década. No obstante, se dispone de ciertas opciones que pueden mejorar el espectro de los tipos de onda con codificación de fase.

En principio, el espectro de la forma de onda de ataque (excitación) de RF puede producirse de forma que caiga arbitrariamente, filtrando los tipos de onda de modulación o las ondas de excitación de bajo nivel moduladas (en FI o en RF). No obstante, estas ventajas pueden anularse en la práctica mediante un recrudecimiento espectral que se produce en el amplificador de potencia del transmisor y en los receptores del entorno. Cuando se utiliza el filtrado premodulación, la transición de segmento a segmento es gradual y no abrupta, pero los tipos de onda bifase y los de tipo polifase que contienen transiciones de fase de 180°, los nulos o los mínimos permanecen en la envolvente de la onda, porque dicha envolvente pasa por cero durante las transiciones entre una fase y otra. Ello no constituye un problema en sí, pero se reducen las ventajas obtenidas mediante otros dos factores. Un factor es la conversión entre la modulación de amplitud y de fase que se produce en los dispositivos del amplificador de potencia. La modulación de fase extraña resultante amplía el espectro. Otra desventaja es que toda alimentación que se produzca en las etapas de amplificación de potencia del transmisor o en los receptores víctima tiende a reintroducir transiciones abruptas en la onda con mínimos. Estos escalones abruptos se traducen en bandas laterales espectrales no deseadas con bordes espectrales que nuevamente caen a sólo 20 dB/década.

Es posible reducir esos recrudecimientos espectrales de forma considerable. Para ello se construyen tipos de onda de excitación (bajo nivel de excitación) que mantienen una envolvente casi constante no sólo durante los intervalos de subimpulso estable, sino también durante las transiciones de fase. En dichos tipos de onda, las transiciones de fase de 180° consisten en rotaciones de la fase de la portadora a lo largo de un semicírculo en el plano I-Q, o real-imaginario, en lugar de movimientos a lo largo de los ejes I o Q que pasan por el origen. Ello puede lograrse mediante moduladores en cuadratura y circuitos adecuados de conformación de onda.

Una categoría alternativa de tipos de onda con codificación discreta es la de modulación por desplazamiento de frecuencia con fase continua (CPFSK). Estas formas de onda son fundamentalmente las mismas que las denominadas de «modulación por desplazamiento mínimo» (MDM) utilizadas en algunos sistemas de comunicación. Aunque en ocasiones se las denomina ondas con modulación por desplazamiento de fase, van en realidad codificadas en frecuencia, porque la fase cambia continuamente, mientras que en su forma básica no filtrada, la frecuencia instantánea cambia abruptamente y permanece constante a lo largo de cada subimpulso. No hay

¹ Las formas de onda por segmentos se conocen en algunos casos como formas de ondas codificadas, aun cuando su codificación no sea discreta.

discontinuidades en la propia forma de onda, pero las hay en la primera derivada. En consecuencia, el espectro se aproxima a asíntotas que caen a una tasa de 40 dB/década. Además, estos tipos de onda tienen una envolvente constante, incluso durante las transiciones de subimpulsos, de forma que son intrínsecamente inmunes a los problemas de recrudescimiento espectral que se producen en los tipos de onda codificadas en fase (como los tipos de onda con barrido de frecuencia no tienen subimpulsos, también son inmunes al recrudescimiento espectral al limitar la conversión de modulación de amplitud a modulación de fase). En los sistemas de comunicación, el filtrado premodulación de los tipos de onda MDM se utiliza ampliamente. Se prevé que dicho filtrado pueda también aplicarse en los radares, en cuyo caso la caída del espectro de emisión podría teóricamente ser mayor de 40 dB/década.

Aunque conviene lograr una caída aguda del espectro de emisión, no deben olvidarse las consecuencias en la resolución de distancia y en la cobertura Doppler, que generalmente se expresan mediante la forma de la «función de ambigüedad». Dicha función representa la magnitud de la señal de salida que evoca el retorno desde un blanco puntual y que es producida mediante un filtro adaptado a la señal transmitida. La función de ambigüedad depende del alcance (retardo temporal) y de la deriva Doppler del retorno del blanco. Como ejemplo extremo, un tipo de onda impulsiva rectangular MF lineal con un producto tiempo-anchura de banda infinito (es decir relación de compresión infinita) tendrá un espectro perfectamente rectangular, excepto por lo referente a la contribución de las rampas de elevación y de caída. Aún así, la respuesta de un filtro adaptado a dicho tipo de onda tendrá una respuesta de tipo $\text{sen}(t)/t$ para un retorno de blanco Doppler constante. Dicha respuesta tiene lóbulos laterales temporales (es decir, de alcance) de sólo unos 13 dB inferiores a los de la respuesta principal, lo que resulta inadecuado en algunas aplicaciones que exigen una resolución elevada de blancos múltiples. La respuesta del filtro adaptado no es simplemente la transformada de Fourier del espectro de emisión. No obstante, hay tendencia a que la caída abrupta del espectro de emisión vaya acompañada en la respuesta por lóbulos laterales elevados al igual que los escalones abruptos en la onda temporal van acompañados por lóbulos laterales grandes en el espectro de emisión. En cierta medida, la supresión de los lóbulos laterales de alcance puede mejorarse desadaptando el procesador de la señal del receptor respecto al impulso transmitido, pero ello implica una pérdida de sensibilidad con relación a la de un filtro adaptado. Es por tanto necesario elegir un tipo de onda que suponga un buen compromiso entre el control espectral, la supresión de lóbulos laterales y la sensibilidad (los tipos de onda con barrido de frecuencia que utilizan un perfil MF ligeramente no lineal suponen un buen compromiso en algunas aplicaciones). No obstante, en general, la necesidad de resolución y sensibilidad buenas reduce las opciones del diseñador. Además, muchas aplicaciones de radar exigen una respuesta casi uniforme a lo largo de una gama considerable de frecuencias Doppler, es decir, es necesaria una «sensibilidad Doppler» reducida. Ello introduce otra limitación para el diseñador en la elección del tipo de onda.

En los sistemas de comunicación, la mejora de la caída espectral que se obtiene mediante el filtrado premodulación se logra a expensas de empeorar la interferencia entre símbolos. Aún así, puede lograrse generalmente una mejora considerable del control espectral antes de que la interferencia entre símbolos resulte inaceptable. En un radar, la mejora espectral que puede obtenerse utilizando el filtrado premodulación se logra a costa de degradar la resolución del radar. También hay que prever que se produzca una ligera pérdida de sensibilidad de detección, debida a las dificultades para construir filtros perfectamente adaptados (o los procesos de correlación) con tipos de onda que contengan esquinas redondas (resultantes del filtrado premodulación) en lugar de discontinuidades agudas. Al igual que en el caso de los sistemas de comunicación analógicos, es razonable prever, no obstante, que puedan lograrse a menudo mejoras considerables del control espectral antes de que la función de ambigüedad o la sensibilidad se degraden significativamente. Tal como se ha indicado, la eliminación de las discontinuidades en el mayor número posible de derivadas de la forma de onda

es lo que determina la pendiente de caída del espectro en última instancia que se logra con separaciones de frecuencia grandes. Ello no exige necesariamente que el filtrado tenga una anchura de banda estrecha, aunque dicha anchura de banda determina la separación de la frecuencia en la que se logra la pendiente última del espectro.

El análisis anterior se aplica cuando la forma de onda tiene una amplitud constante en las partes estables de su subimpulso. La utilización de módulos múltiples de amplificadores de potencia (generalmente amplificadores de estado sólido) en arquitecturas de combinador entre guías o combinación de potencia espacial, ofrece nuevas posibilidades para utilizar formas de onda moduladas en amplitud suaves. No se conoce aún su utilización en los radares actualmente instalados, pero puede que se utilicen en el futuro dichos tipos de onda. Se establecería con ello otro grado de libertad del diseño que puede explotarse parcialmente para controlar los espectros de emisión del radar.

4 Selección de los dispositivos de salida de radar

La selección del dispositivo de salida del transmisor de radar afecta al diseño no sólo del transmisor, sino también del receptor de radar de los sistemas de antena. Además, el diseño de los sistemas de radar multifunción puede complicar aún más la selección de un dispositivo de salida de radar. Entre otros factores importantes del diseño al seleccionar el dispositivo de salida están: la eficacia de energía (conversión de la energía continua en RF), la anchura de banda instantánea (anchura de banda de sintonía disponible sin ajustes) y la coherencia de impulso a impulso (fase relativa de cada impulso que es importante para el procesamiento Doppler), el peso, el tamaño, la solidez mecánica, la vida útil del dispositivo y el coste.

El Cuadro 1 muestra las características del dispositivo de salida para los factores principales considerados en el diseño de los sistemas de radar. Como se ve en dicho Cuadro, hay una amplia variación de las características del dispositivo de salida en los factores diseño principales de potencia de cresta, anchura de banda instantánea y eficacia de energía. Debe señalarse que en la selección del dispositivo de salida del radar debe prestarse una atención principal a los factores de diseño anteriores para realizar las misiones del radar. Las características de emisión no esencial del dispositivo de salida del radar se consideran únicamente después de satisfacer todos los objetivos de la misión.

CUADRO 1

Características de los dispositivos de salida del radar aplicables al diseño de los sistemas de radar

| Dispositivo de salida | Gama de potencia de salida de cresta (kW) | Eficacia de energía (%) | Anchura de banda a 1 dB instantánea (% de frecuencia de la portadora) | Coherencia entre impulsos | Peso (kg) | Tamaño | Robustez mecánica | Esperanza de vida útil relativa ⁽¹⁾ | Coste relativo ⁽²⁾ |
|--|---|-------------------------|---|---------------------------|--------------------|---------|-------------------|--|-------------------------------|
| <i>Campos cruzados⁽³⁾:</i> | | | | | | | | | |
| Amplificadores de campos cruzados | 60-5 000 | 40-65 | 5-12 ⁽⁴⁾ | Si | 25-65 | Pequeño | Buena | 1,0 | Bajo |
| Magnetrones (desbloqueados) | 20-1 000 | 35-75 | (4) | No | 1-25 | | | | |
| Magnetrones (bloqueados) | 20-1 000 | 35-75 | (4) | Si | 1-25 | | | | |
| Magnetrones coaxiales | 10-3 000 | 35-50 | (4) | No | 2-55 | | | | |
| <i>Haces lineales:</i> | | | | | | | | | |
| Tubo de ondas progresivas de cavidad acoplada | 25-200 | 20-40 | 10-15 | Si | 10-135 | Grande | Buena | 7,4 | Alto |
| Klitrón | 20-10 000 | 30-50 | 1-12 | Si | 25-270 | | | | |
| Tuistrón | 2 000-5 000 | 30-40 | 1-12 | Si | 55-65 | | | | |
| <i>Transistores de estado sólido (Módulos clase C en paralelo):</i> | | | | | | | | | |
| Módulos bipolares de silicio | 10-90 | 20-30 | 10-30 | Si | 0,5-2,5 por módulo | Pequeño | Excelente | 15 | Alto |
| Transistores de efecto de campo de arseniuro de galio ⁽⁵⁾ | 0,5-5,0 | 10-25 | 10-30 | | | | | | |

(1) La esperanza de vida útil está normalizada en relación con un magnetrón convencional de los años 70 y no refleja la mayor vida útil de los magnetrones convencionales de tecnología más reciente.

(2) Depende del volumen de producción.

(3) Probablemente, los dispositivos de salida de campo transversal se eliminarán de muchos diseños futuros de radar; no obstante, se prevé que continúe su utilización en los sistemas de radionavegación marítima.

(4) Aunque los magnetrones no tienen una capacidad de anchura de banda instantánea, pueden obtenerse gamas de frecuencias de sintonía hasta del 10% de la frecuencia de funcionamiento.

(5) Los módulos bipolares de silicio (Si) se utilizan en general por debajo de 3,5 GHz y los módulos de arseniuro de galio (GaAs) en la banda de 5 GHz.

(6) Depende del número de módulos combinados en la etapa de salida.

Los niveles de las emisiones no esenciales de los transmisores de radar dependen del dispositivo de salida utilizado en el transmisor del radar. El conocimiento de las características intrínsecas de las emisiones no esenciales de los diversos dispositivos de salida utilizados en los transmisores de radar es esencial para el uso eficaz del espectro y para reducir al mínimo las interferencias causadas a los servicios que funcionan en bandas adyacentes.

El Cuadro 2 enumera las características de las emisiones no esenciales (no armónicas y armónicas) aplicables a los dispositivos de salida utilizados en sistemas de radar. Los sistemas de radar que utilizan dispositivos de salida de campos cruzados tienen niveles de emisiones no esenciales no armónicos intrínsecos que requerirían filtrado si los límites de las emisiones no esenciales son superiores a aproximadamente -60 dBc. Tanto los dispositivos de salida de tubos de haces lineales como los de estado sólido tienen niveles de emisiones no esenciales no armónicas intrínsecos que están por debajo de -100 dBc. Todos los dispositivos de salida de radar tienen emisiones no esenciales armónicas en la gama de -15 a -55 dBc y, por consiguiente, es necesario filtrado para eliminar las emisiones no esenciales armónicas. Para radares con dispositivos de salida distribuidos (formaciones de antenas fasadas) puede no ser práctico el filtrado.

CUADRO 2

**Características de las emisiones no esenciales de dispositivos de salida
por impulsos de radiodeterminación**

| Dispositivo de salida ⁽¹⁾ | Nivel de emisiones no esenciales | | | |
|---|----------------------------------|---------------------------------------|-------|-------|
| | No armónico (dBc) en 1 MHz | Armónico ^{(2), (3)} (dBc) | | |
| | | 2º | 3º | 4º |
| <i>Campos cruzados:</i> | | | | |
| Amplificadores de campos cruzados | | | | |
| Magnetrones (desbloqueados) ⁽⁴⁾ | -35 a -50 ⁽⁵⁾ | -25 | -30 | -45 |
| Magnetrones (bloqueados) ⁽⁴⁾ | -65 a -80 ⁽⁵⁾ | -40 | -20 | -45 |
| Magnetrones coaxiales ⁽⁴⁾ | -75 a -90 ⁽⁵⁾ | -40 | -20 | -45 |
| | -60 a -75 ⁽⁵⁾ | -40 | -20 | -45 |
| <i>Haces lineales:</i> | ⁽⁶⁾ | | | |
| Tubo de ondas progresivas de cavidad acoplada | | | | |
| Klistrón | -105 a -115 | -20 | -25 | -35 |
| Tuistrón | -110 a -120 | -20 | -25 | -35 |
| | -105 a -115 | -20 | -25 | -35 |
| <i>Transistores en estado sólido (Módulos clase C en paralelo):</i> | | | | |
| Módulos bipolares de silicio | -100 a -110 | -45 | -55 | -65 |
| Transistores de efecto de campo de arseniuro de galio | -100 a -110 | -35 | -45 | -55 |

- (1) Los dispositivos de salida alternativa pueden ser más aplicables en sistemas que funcionan por encima de 5 GHz. Entre estas opciones se incluyen, aunque no solamente, los tubos de onda progresiva de barra en hélice/anillo y los magnetrones de tecnología más reciente.
- (2) Los niveles de emisiones no esenciales armónicas enumerados son valores nominales. En términos generales, la gama de emisiones no esenciales armónicas suele ser de $+5$ dB a -10 dB de los valores nominales.
- (3) Los niveles de emisiones armónicas pueden reducirse por debajo de -100 dBc con un filtro de armónicos (paso bajo).
- (4) Los dispositivos de salida de magnetrones más antiguos llegan a tener modos $\pi - 1$ intrínsecos que pueden estar sólo 40 dB por debajo de la portadora. Estos modos son intermitentes y de corta duración y se producen durante el inicio de las oscilaciones. Los magnetrones de tecnología más reciente se diseñan para suprimir estas emisiones.
- (5) Los niveles de emisiones no armónicas en dispositivos de campos cruzados pueden reducirse por debajo de -100 dBc con un filtro paso banda para guíaondas. En general, estos filtros tienen unas pocas décimas de dB de pérdida de inserción.
- (6) Los dispositivos de salida de haces lineales puedan tener emisiones no esenciales no armónicas próximas a la portadora del orden de -80 dBc a -90 dBc según las características de la selectividad total de la caridad.

5 Filtro de salida de radar

Los filtros de RF en la salida de transmisor pueden ser muy útiles para suprimir las emisiones armónicas. Los filtros de RF pueden también utilizarse para suprimir las emisiones «fuera de banda» y las emisiones no esenciales y no armónicas, más cercanas a la emisión fundamental que los armónicos. No obstante, su utilidad para controlar los tramos relativamente próximos del espectro de emisión es limitada. Ello es debido parcialmente a su coste, peso y tamaño adicionales y también al hecho de que muchos radares son sintonizables y/o utilizan múltiples tipos de ondas, algunos de los cuales tienen anchuras de banda necesarias más amplias que otros. Apenas es práctico implementar filtros de RF de gran potencia que puedan reconfigurarse para dar cabida a las variaciones de la frecuencia de la portadora o de la onda de impulsos, especialmente cuando se considera que dichas variaciones se producirán probablemente en un espacio de milisegundos.

La arquitectura del transmisor también es un factor importante del grado obtenible de control del espectro. Cuando se utilizan múltiples amplificadores de potencia, en el índice de caída de la emisión espectral y en su nivel influye el hecho de si las salidas de estos amplificadores de potencia se combinan en las guías de onda del transmisor o únicamente en el espacio tras la radiación. La combinación en la guía crea efectivamente una desadaptación aguda de impedancias entre los componentes mutuamente incoherentes de los tipos de ondas de salida de los amplificadores de potencia, lo que puede reducir considerablemente la potencia de ruido radiada con relación a la suma de las potencias de ruido disponibles de los amplificadores. Por otro lado, en los sistemas de radares alimentados por múltiples amplificadores, la combinación de potencia espacial constituye una arquitectura interesante, aunque permite radiar toda la potencia de ruido de los amplificadores. En dichos sistemas de radar las oportunidades para el filtrado de RF también son limitadas. Ello es debido parcialmente a la necesidad de un filtro aparte para cada amplificador, y el número de amplificadores puede ser del orden de centenas o de millares. También se debe parcialmente a que el espacio entre filtros habrá de ser del orden de media longitud de onda, pues los elementos radiantes suelen estar cercanos entre sí para evitar la aparición de lóbulos inaceptables en el diagrama de ganancia de la antena. Dicho espacio es insuficiente para un filtrado muy escaso.

Como muestra el Cuadro 2, la selección del dispositivo de salida de radar tiene un gran efecto en el requisito de filtrado de emisiones no esenciales no armónicas. No obstante, como ya se ha indicado, la selección del dispositivo de salida de radar no puede basarse enteramente en las características de las emisiones no esenciales. Debido a los niveles intrínsecamente altos de las emisiones no esenciales armónicas de todos los dispositivos de salida, la supresión de emisiones no esenciales armónicas por el uso de filtros de armónicos (paso bajo) se efectúa generalmente cuando es práctico. Para reducir las emisiones no esenciales no armónicas de algunos radares moderados y de alta potencia en bandas adyacentes a las bandas de radiodeterminación, se requerirían también filtros paso banda después del transmisor del radar para algunos dispositivos de salida de radar. En general, éstos deberán estar separados del filtro de armónicos, ya que las características de banda de bloqueo amplia de los filtros de supresión de armónicos no pueden conseguirse normalmente junto con las características de corte abrupto de los filtros de supresión de banda adyacente. Sin embargo, los filtros necesarios pueden ser muchos más de dos; en los radares con formaciones de antenas activas, sería necesario interponer uno o dos filtros entre cada dispositivo de salida de potencia y el elemento o subformación que lo alimenta. En conjunto, se necesitarían millares de filtros.

El coste de estos filtros puede ser significativo, dado que son necesarios tipos de filtros no convencionales, que a veces requieren presurización o evacuación, para tratar las altas potencias y mantener la supresión deseada en una banda de bloqueo amplia. La utilización de dichos filtros impone también soluciones de compromiso en la calidad del sistema de radar. La pérdida de inserción de los filtros de armónicos del transmisor y los filtros paso de banda para radares en estas bandas oscila entre 0,1 dB y 0,7 dB. Si se requieren tanto filtros de armónicos como filtros paso banda, la pérdida de inserción será aproximadamente el doble. Debido a las numerosas variables en el funcionamiento del radar, la disminución correspondiente en la detección y la calidad de

seguimiento suele pasar desapercibida, pero el hecho es que incluso 0,2 dB representa una gran pérdida de potencia RF (por ejemplo, 47 kW de potencia de cresta en el caso de un radar de 1 MW). El transmisor tendría que ser mucho más potente para recuperar la pérdida de calidad, dado que debe suponerse que ya se habrían explotado medios para mejorar la calidad más eficaces en términos de coste. Por ejemplo, una pérdida de 0,4 dB corresponde a una reducción del 2,3% de la gama de detección, que no tiene consecuencias en la mayoría de los radares pero que es significativa para algunos. La relación de ondas estacionaria de ambos tipos de filtros está en la gama de 1,1 a 1,3.

Asimismo, el tratamiento de la potencia, y el tamaño y el peso del filtro son factores que deben considerarse para saber si es posible utilizar un filtro de salida en el radar, en particular en los radares móviles. El tamaño y el peso pueden ser consideraciones limitadoras en el caso de radares con formaciones de antenas activas móviles. El filtrado de bandas próximas a la del funcionamiento del radar requiere una selectividad aguda y, por consiguiente, una gran acumulación de energía, que plantea el riesgo de interrupción (o disminuye la capacidad de tratamiento de la potencia) y puede también introducir una distorsión en fase en el paso de banda, otra consideración importante para los radares con formaciones de antenas activas. Cuanto mayor es la potencia del radar, más atenuación se necesita para suprimir las salidas de emisiones no esenciales a un nivel determinado, por lo que los filtros necesitarán más secciones y, por consiguiente, tenderán a ser mayores su pérdida de inserción, su tamaño y su peso.

La realización del filtrado del transmisor se hace mejor durante el diseño original del radar. La adición de filtros de transmisor a los radares existentes se ha logrado en muchos casos con repercusiones mínimas sobre la calidad del sistema, pero en otros ha habido problemas de interrupción cuando se añadió un filtro de paso de banda para suprimir emisiones de banda adyacente.

6 Tendencias del radar

Las grandes áreas que impulsan el avance en la selección de los dispositivos de salida de radar son:

- el procesamiento de la señal de radar digital, que está produciendo un rápido crecimiento en los radares de efecto Doppler que necesitan una alta coherencia entre impulsos (dispositivos de salida de haces lineales y de estado sólido),
- el desarrollo de dispositivos de transmisor de estado sólido de potencia más alta (configuraciones modular/monolítica y distribuida (formaciones de antenas en fase)),
- el desarrollo de magnetrones de nueva tecnología se ha concebido específicamente para reducir las emisiones no deseadas y también para ofrecer vidas operacionales considerablemente más grandes que las de los tipos convencionales más antiguos.

Estas tendencias influirán en la reducción de los niveles de emisiones no deseadas de las más nuevas generaciones de radar.
